



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA
DE MINAS Y ENERGÍA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Estudio de un prototipo de batería de bajo coste para el almacenamiento de energía en hogares con recursos limitados

Study of a low-cost battery prototype for energy storage in households with limited resources

Para acceder al título de:
Grado en Ingeniería de Recursos Energéticos

Autor: Gorka Andérez Álvarez
Director: José Salmón García
Convocatoria: septiembre 2020

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. MARCO HISTÓRICO	7
2. ALCANCE Y OBJETIVO	9
3. ESTADO DEL ARTE	11
3.1. QUÉ ES LA BATERÍA Y CÓMO ESTÁ FORMADA	11
3.2. ESTRUCTURAS DE LAS BATERÍAS	12
3.3. TIPOS DE BATERÍAS DE LITIO	15
3.4. CICLO DE VIDA	21
3.5. MARCO LEGAL	22
3.5.1. Autoabastecimiento en hogares	22
3.5.2. Legislación actual	23
4. METODOLOGÍA	25
4.1. PARÁMETROS QUE DEFINEN UNA BATERÍA	25
4.2. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN RESPECTO A OTRAS ALTERNATIVAS	28
4.3. ELECCIÓN	30
5. CONSTRUCCIÓN	38
5.1. PARTES PRINCIPALES	38
5.1.1. Celdas	38
5.1.2. Sistema de Gestión de Baterías (BMS)	40
5.1.3. Estructura espaciadora y soportes para celdas (Holders)	43
5.1.4. Embarrado/Barras de cobre (Busbar)	43
5.1.5. Fusibles de cristal	45
5.1.6. Tira de níquel	45
5.2. COMPONENTES AUXILIARES	46
5.2.1. Evaluador/Cargador de baterías	46
5.2.2. Cámara térmica	47
5.2.3. Máquina de soldar por puntos	47
5.2.4. Soldador de estaño	48
5.2.5. Conectores Anderson	48
5.2.6. Interruptor aislador de la batería	49
5.2.7. Multímetro digital	49

5.2.8. Tubo PVC termo retráctil	50
5.3. CONEXIÓN DE LA BATERÍA	50
6. CÁLCULOS EN LA VIVIENDA	53
6.1. CARACTERÍSTICAS Y ENERGÍA ESTIMADA.....	55
6.1.1. Primer caso: Dos días de autonomía sin recarga	55
6.1.2. Segundo caso: Un día de autonomía con recarga	57
6.2. CONEXIÓN EN EL HOGAR	57
6.2.1. Acoplamiento CC y CA	59
6.2.2. Sistema de almacenamiento.....	62
6.2.3. Tecnología Multi-Flow.....	64
7. PROBLEMÁTICAS A TENER EN CUENTA	67
7.1. SEGURIDAD Y SALUD	67
7.2. CORTOCIRCUITOS	67
7.3. RECALENTAMIENTO BATERÍAS Y REFRIGERACIÓN	68
7.4. ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN.....	72
7.5. REPARACIONES	72
8. RESULTADOS.....	73
8.1. DIMENSIONES Y PESO DE LA BATERÍA	73
8.2. VIABILIDAD ECONÓMICA Y ESPECIFICACIONES	74
8.3. MÁRGENES DE PRESUPUESTO	79
9. CONCLUSIONES	81
10. BIBLIOGRAFÍA	82
Referencias Bibliográficas.....	82
Bibliografía Complementaria	86

Índice de figuras

Figura 1.1. Experimento de Volta con la batería eléctrica en 1796.....	7
Figura 1.2. Distribución actual de las baterías en el mercado	8
Figura 2.1. Evolución del precio del litio en los últimos años.	10
Figura 3.1. Baterías de iones de litio en el mercado mundial, por aplicación 2000-2025 (toneladas).....	11
Figura 3.2. Intercambio de iones en una batería de iones de litio.....	12
Figura 3.3. Celda de bolsa	13
Figura 3.4. Sección de una celda prismática.....	14
Figura 3.5. Sección de una celda cilíndrica de iones de litio.....	15
Figura 4.1. Relación entre la capacidad y la resistencia como resultado del número de ciclos de la batería.....	27
Figura 4.2. Capacidad de energía de mega factorías de baterías de iones de litio.....	28
Figura 4.3. Dimensiones de la celda Panasonic NCR18650B (mm).....	31
Figura 4.4. Evolución de la relación entre el coste de las baterías y su densidad energética.	32
Figura 4.5. Tecnología de capa de resistencia al calor (HRL).	33
Figura 4.6. Especificaciones y parámetros de la celda Panasonic de iones de litio NCR18650B.....	34
Figura 4.7. Características de carga (Panasonic NCR18650).	35
Figura 4.8. Características de carga en función de la temperatura.....	35
Figura 4.9. Características de descarga en función de la temperatura (Panasonic NCR18650).....	36
Figura 4.10. Características de descarga en función del ratio de descarga (Panasonic NCR18650).....	36
Figura 4.11. Características de vida útil (Panasonic NCR18650).	37
Figura 5.1. Celda Panasonic NCR18650B	39
Figura 5.2. Módulo de la batería.	40
Figura 5.3. Tres partes de una batería	42
Figura 5.4. BMS Batrium Watchmon 4 Longmon.	42
Figura 5.5. Estructura y soporte de celdas.	43
Figura 5.6. Cable de 35 mm ²	45
Figura 5.7. Fusibles de vidrio.	45
Figura 5.8. Tira de níquel.	46

Figura 5.9. Evaluador/Cargador de baterías.	46
Figura 5.10. Cámara de imagen térmica infrarroja.	47
Figura 5.11. Máquina de soldar por puntos.	47
Figura 5.12. Soldador de estaño.	48
Figura 5.13. Conector de 175 A para cable de 35 mm ²	48
Figura 5.14. Interruptor aislador de batería.	49
Figura 5.15. Multímetro digital automático.	49
Figura 5.16. Tubo de PVC termo retráctil.	50
Figura 5.17. Esquema simplificado de la conexión en paralelo de las celdas en el módulo.	51
Figura 5.18. Esquema de conexión de los módulos en serie simplificado.	51
Figura 5.19. Conexión del BMS a los módulos de la batería.	52
Figura 6.1. Consumo total en un día de los sectores de industria, servicios y residencias.	53
Figura 6.2. Perfil de consumo en invierno y verano.	54
Figura 6.3. Distribución del consumo anual de un hogar medio.	54
Figura 6.4. Consumo eléctrico medio anual de una vivienda familiar.	55
Figura 6.5. Esquema de la instalación	58
Figura 6.6. Acoplamiento CC	60
Figura 6.7. Acoplamiento CA	61
Figura 6.8. Acoplamiento CC + Acoplamiento CA	62
Figura 6.9. Flujos de energía en sistema de almacenamiento.	63
Figura 6.10. Suministro simultaneo de la instalación fotovoltaica y la batería.	64
Figura 6.11. Carga de la batería y suministro de energía en la vivienda.	65
Figura 6.12. Carga de la batería y suministro de energía en la vivienda con distintas fuentes de energía.	65
Figura 6.13. Alimentación de emergencia de la instalación de paneles fotovoltaicos.	66
Figura 7.1. Efecto de la temperatura en una celda Li-ion.	69
Figura 7.2. Configuraciones y métodos de refrigeración de una celda de bolsa.	70
Figura 8.1. Disposición de las celdas en el soporte o holder.	73
Figura 8.2. Celdas 18650 de distintos fabricantes.	75
Figura 8.3. Celdas 18650 de una batería de ordenador portátil.	77
Figura 8.4. Presupuesto Second Life Battery	78
Figura 8.5. Batería del Tesla Model S.	78

Figura Anexo.1. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección. . 90

Índice de tablas

Tabla 3.1. Tabla de las baterías de iones de litio más comunes	21
Tabla 4.1. Comparativa de baterías principales en el mercado actual.....	29
Tabla 4.2. Especificaciones de la celda NCR18650B.....	32
Tabla 8.1. Dimensiones y disposición de las celdas en los módulos de la batería	74
Tabla 8.2. Listado de diferentes celdas (capacidad y precio).	76
Tabla 8.3. Presupuesto para el conjunto de la batería.	80

1. INTRODUCCIÓN

La energía utilizada hoy en día se suministra mediante sistemas de generación convencional y renovable. Bien es sabido por todos la evolución y transición energética que se va a desarrollar en el futuro próximo con gran potencial y predilección por las energías renovables y no contaminantes. A pesar de ello, la consecución en el futuro de estas expectativas plantea la necesidad de poder acumular la energía generada, minimizando así las pérdidas y aprovechando los excedentes producidos. Por ello, se plantea mediante este trabajo, un estudio sobre la posibilidad actual de almacenamiento de energía que, se puede llegar a realizar en las viviendas. Para ello, se procede a estudiar el desarrollo y construcción de una batería mediante una aproximación económica y viable. Por último, es necesario añadir que dicha transición requiere de un planteamiento gradual, consciente y responsable por parte de todos los ciudadanos.

1.1. MARCO HISTÓRICO

El uso de las baterías y sus avances provienen de unos cuantos años atrás. A principios de 1800 Alessandro Volta descubrió que ciertos fluidos generaban un flujo constante de electricidad usados como conductores. Este descubrimiento dio lugar a la primera celda voltaica, más conocida como batería, pudiendo aumentar su tensión si se disponían en serie.

Este descubrimiento dio lugar al conocimiento de la influencia de los distintos tipos de metales en la tensión de una batería (plata y zinc), siendo éstos los electrodos, y el electrolito usado agua salada.

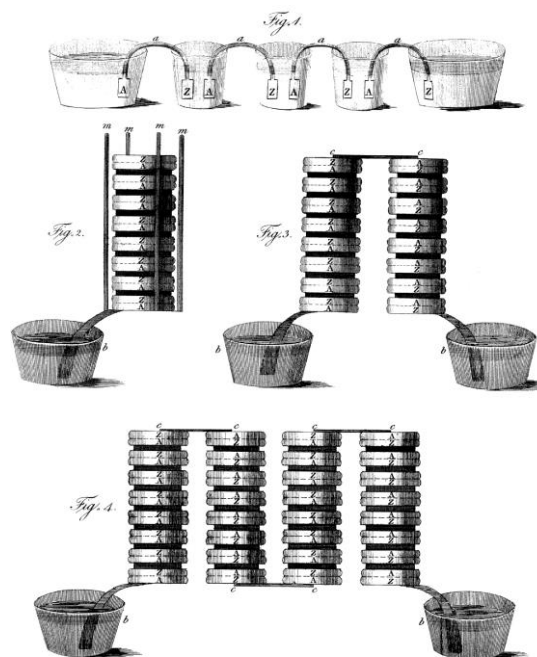


Figura 1.1. Experimento de Volta con la batería eléctrica en 1796.

Fuente: "On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds" [1].

Hasta 1844 se siguieron desarrollando prototipos inspirados en la celda de Volta, pero sin llegar a tener gran repercusión, fue en este año gracias a cuando William Robert Grove inventa su propia batería de mayor potencia. Este invento tuvo gran trascendencia en el uso de los telégrafos hasta 1860, año en el cual Gaston Planté invento la batería de plomo y ácido que con el paso de los años se iría mejorando y desarrollando.

A finales de siglo, en 1899, Waldemar Jungner fabrico la primera batería recargable, compuesta de electrodos de níquel y cadmio en una disolución de hidróxido de potasio. Este modelo fue la base de la batería que desarrollaría Thomas Alva Edison en 1901, con la única diferencia de sustituir el cadmio por hierro manteniendo el electrolito de hidróxido de potasio, para después comercializarla.

Años más tarde, en 1955, Lewis Urry desarrolló las celdas alcalinas basadas en un cátodo de dióxido de manganeso y un ánodo de cinc en un electrolito alcalino.

Hasta 1970, no empezaron a comercializarse las primeras baterías de litio, compuestas en su cátodo de diversas sustancias. En este mismo año se desarrollaron y mejoraron las baterías de plomo y ácido.

A partir de la década de los 90 el desarrollo en este sector aumentó considerablemente, comenzando la comercialización de las baterías de iones de litio, por medio de Sony en 1991 y las de polímero de litio en 1995 por Bellcore.

Grandes empresas como Duracell e Intel colaboraron en el gran desarrollo de este sector e investigaciones realizadas por universidades como las de Texas, Montreal, Quebec y MIT entre otras han contribuido en las diferentes variantes de baterías de litio y su tecnología que disponemos a día de hoy.

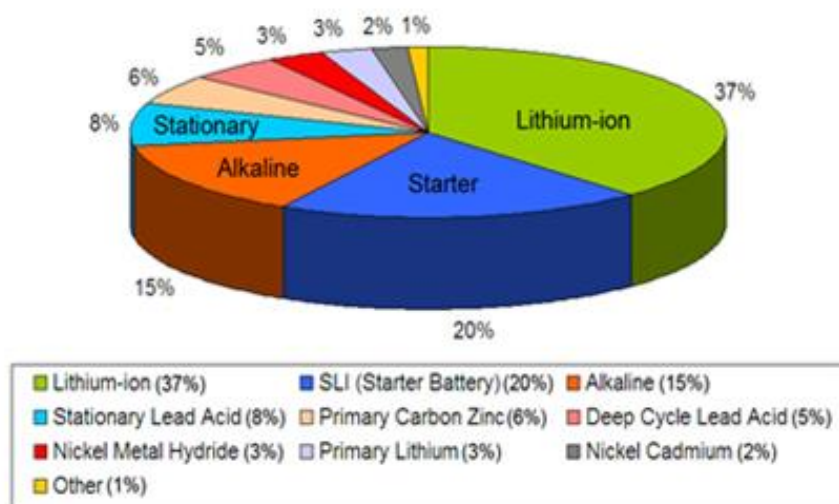


Figura 1.2. Distribución actual de las baterías en el mercado.

Fuente: Frost & Sullivan

Gran porcentaje hoy en día en el mercado viene dado por el uso de tres tipos de baterías principalmente, siendo las de iones de litio las de principal uso por delante de las SLI (arranque, iluminación e ignición) de los vehículos y las alcalinas.

2. ALCANCE Y OBJETIVO

La red de suministro eléctrico no ha cambiado especialmente desde que la inventaron Tesla y Edison hace aproximadamente cien años. Durante este periodo se han buscado y desarrollado diversas maneras de almacenar la energía eléctrica y por supuesto también de generarla. Siendo en este siglo más que evidente la llegada de la transición energética, se plantea la incógnita de cómo se desarrollaran estas tecnologías en el futuro. De momento, las energías renovables están todavía en una etapa inicial pese a verse reducido el precio de estas tecnologías a medida que avanzan los años y se hacen más rentables.

De cara al futuro pueden parecer muy prometedoras, teniendo en cuenta que los recursos son limitados a la hora de generar energía de forma convencional, pero no todo son ventajas.

La inconsistencia es el problema de la energía solar y eólica ya que no son predecibles a largo plazo. Por eso mismo se propone en este trabajo el uso de las baterías como posible solución para estos problemas. Utilizando la batería como almacenador de energía eléctrica en momentos de mayor incidencia solar y eólica evitando así la contaminación causada por la generación de electricidad convencional y pudiendo actuar cuando no haya sol o viento sobre los paneles fotovoltaicos o pequeñas torres eólicas instaladas en los hogares.

Para las energías renovables es la pieza del puzzle que falta, almacenar energía en baterías. Este tipo de proyectos todavía están en una fase inicial a nivel internacional, por lo que tanto los materiales utilizados en las baterías de grandes capacidades y la instalación correspondiente en un hogar todavía suponen una inversión bastante elevada para la mayoría de las personas.

Este proyecto se enfoca principalmente en la construcción detallada de una batería de iones de litio, ya que a día de hoy son las más populares y estudia su posibilidad de fabricación de una manera más económica.

El litio, un recurso mineral limitado, cuyo precio de mercado varía con la especulación y la variación de la demanda, no ha variado considerablemente en los últimos dos años a nivel económico, por lo que, de cara a medio plazo, en el futuro existe la posibilidad de que este tipo de baterías se establezcan en el mercado, puesto que a medida que están aumentando la cantidad de minas de litio, como se puede observar, el precio del litio ha empezado a disminuir.



Figura 2.1. Evolución del precio del litio en los últimos años.

Fuente: Benchmark Mineral Intelligence

Otro aspecto a tener en cuenta de cara al futuro es el posible descubrimiento de avances tecnológicos que en materia de baterías dejen de forma obsoleta a las baterías de litio. Pero con bastante seguridad se puede afirmar que de cara al futuro los hogares serán autosuficientes generando y consumiendo su propia energía, por ello también se especula con la posibilidad de venta de excedente de generación de energía de las casas entre vecinos de una misma comunidad [2].

En definitiva y lo que realmente se busca en estos sistemas de almacenamiento de energía es que contribuyan de la manera más eficiente posible energéticamente de cara al futuro, que sean sostenibles y que se genere un consumo responsable en torno a ellos.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. QUÉ ES LA BATERÍA Y CÓMO ESTÁ FORMADA

Las baterías de litio permiten desarrollar a día de hoy todo tipo de tecnología moderna y se encuentran en múltiples aplicaciones gracias a su peso ligero, el poco ruido que generan y a sus densas propiedades de energía, desde teléfonos móviles, cámaras, aparatos médicos o trajes espaciales de la NASA hasta elementos más grandes como los vehículos eléctricos. Bien cabe añadir que también existen otro tipo de baterías extendidas para otros usos como son las de plomo y ácido o las de base de níquel, pero en este caso el estudio se centra en las baterías de litio ya que su proyección a futuro es bastante prometedora.

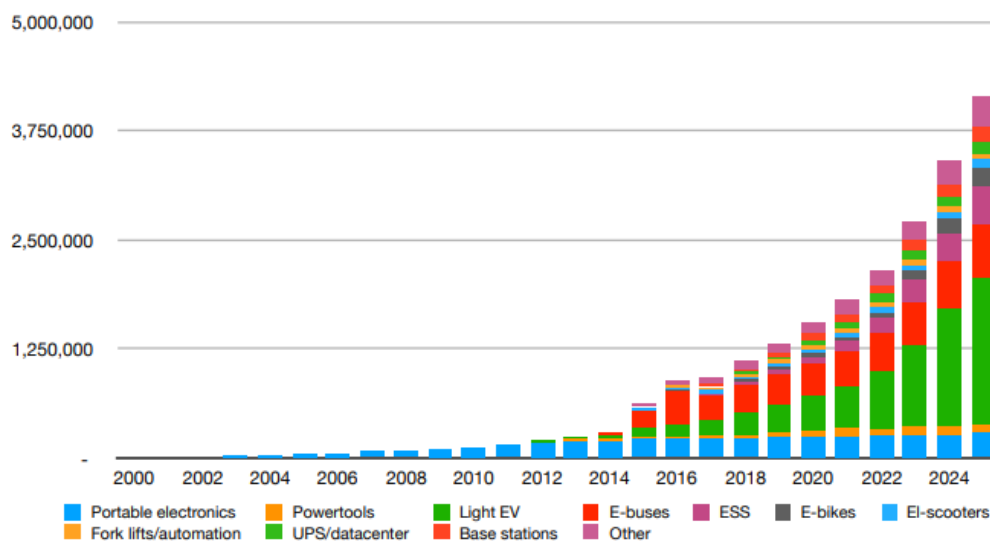


Figura 3.1. Baterías de iones de litio en el mercado mundial, por aplicación 2000-2025 (toneladas).

Fuente: Circular Energy Storage

La evolución de estas se ha desarrollado tanto que no solo suministra energéticamente a nuestros móviles o coches, sino que ha llegado el punto de poder sustentar la energía necesaria para un comercio, o como en nuestro caso, una vivienda. La batería para nuestra vivienda, en términos generales, actuaría como si fuese un “banco” para la energía, depositando energía en ella cuando no la necesitas y sacándola cuando la necesites.

A pesar de lo complejo que pueda parecer y de los años de investigación y desarrollo que dieron lugar a estas baterías, los procesos eléctricos y químicos que se llevan a cabo y que permiten el funcionamiento de las baterías de litio es bastante simple.

Poniendo como ejemplo las baterías de iones de litio, ya que son de por sí las más comúnmente conocidas y usadas hoy en día, su composición está compuesta principalmente de cuatro partes importantes: cátodo (terminal positivo), ánodo (terminal negativo), electrolito y un separador poroso.

El cátodo varía dependiendo del tipo de pila, pero es siempre un compuesto de litio con otros tipos de materiales (Co, Mn, Al, Ni, Fe, etc.). El ánodo está formado casi siempre por grafito y a veces incluye otros elementos. El electrolito es generalmente un compuesto

orgánico que contiene sales de litio para transferir iones de litio. El separador poroso permite a los iones de litio pasar a través de él mientras también separa el ánodo del cátodo dentro de la pila.

Cuando la celda esta descargada, los iones de litio se mueven del ánodo, oxidándose o perdiendo electrones, al cátodo, reduciéndose o ganando electrones, pasando a través del electrolito. Esto produce la descarga de electrones en el lado del ánodo, alimentando el circuito y así cualquier aparato conectado a él. Cuando la celda se recarga, este proceso es el mismo pero revertido pasando los iones de litio de nuevo desde el cátodo al ánodo.

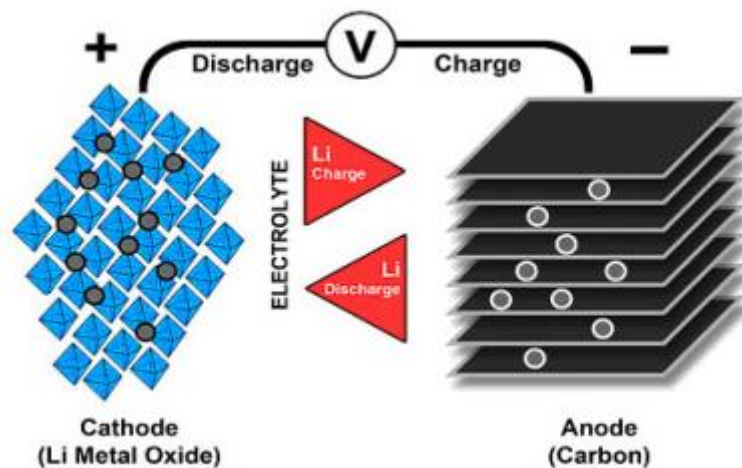


Figura 3.2. Intercambio de iones en una batería de iones de litio.

Fuente: Battery University

La principal diferencia y donde se complican más las cosas es en las estructuras de dichas celdas y las diferencias en sus procesos químicos que se mencionan más adelante.

En cuanto a la instalación global en la vivienda, la batería almacena directamente la energía de la fuente de generación renovable pasando por un inversor que convierte la energía continua en alterna, en el caso de paneles fotovoltaicos. Igualmente, es necesaria la instalación de un regulador de carga para controlar el flujo de energía con el fin de testear continuamente el nivel de carga de la batería con el fin de optimizar su vida útil.

Más adelante, se detalla la constitución de una batería y sus conexiones mediante agrupaciones de las celdas en serie y paralelo según los requerimientos necesarios.

3.2. ESTRUCTURAS DE LAS BATERÍAS

Las baterías de litio están disponibles en distintas formas, aunque su base de construcción es siempre la misma. Todas las baterías de litio tienen un electrodo positivo (cátodo), un electrodo negativo (ánodo), un material electrolito y un separador poroso entre medias que permiten a los iones de litio moverse entre el cátodo y el ánodo. La principal diferencia entre las diversas formas de las pilas es la forma en la que están ensambladas.

Celdas de bolsa

Las pilas de bolsa son las más simples de todas. Se caracterizan por parecerse a una pequeña “bolsa de aluminio” delgada con dos terminales o lengüetas al borde de la bolsa. Dentro de esta se encuentran el cátodo y ánodo en lados opuestos separados por el material poroso y con el electrolito a cada lado del separador poroso. Estas láminas de cátodo-electrolito-ánodo est n dobladas muchas veces dentro de la bolsa para aumentar la capacidad de la batería.

No hay un tamaño estándar ya que son producidas por diferentes compañías (Panasonic, LG Tech, etc.) de manera que son diseñadas para tamaños concretos en función del producto específico deseado, como puede ser un teléfono móvil, para garantizar el máximo uso de espacio posible.

La ventaja de este tipo de celdas son su poco peso y su poco coste de producción. Su principal desventaja es que no disponen de una protección exterior y por ello pueden ser dañadas si no est n protegidas dentro de una carcasa. La falta de una carcasa exterior robusta se traduce en que son las más ligeras y las más eficientes, en cuanto a espacio se refiere, de todas. Normalmente son usadas en teléfonos móviles u ordenadores portátiles que funcionan como carcasa de protección.

Realmente, estas celdas cumplen mejor cuando est n contenidas en cualquier estructura rígida o semirrígida capaz de aportar una ligera cantidad de presión sobre la celda. Esto permite poner más en contacto a las capas de la celda y previene la microdelaminaci n, la cual puede degradar el rendimiento de la celda con el tiempo.

Cuando una de estas celdas envejece puede empezar a expandirse o explotar. Esto se produce por pequeños cortocircuitos en su interior a medida que la pila envejece, generando gas y haciendo que aumente la bolsa. Su expansión resulta en la reducción del rendimiento debido a que las capas se delaminan pudiendo en el peor de los casos llegar a explotar y emitir un gas inflamable.



Figura 3.3. Celda de bolsa.

Fuente: A123

Celdas prismáticas:

Las celdas prismáticas son bastante similares a las celdas de bolsa, excepto porque estas tienen añadida una carcasa rectangular por fuera de la celda. Esto le da a la celda la forma de prisma rectangular.

Estas son menos eficientes en cuanto a espacio que las celdas de bolsa, pero aun así son más duraderas. Mientras que las de bolsa hay que manejarlas con cuidado, las prismáticas pueden soportar más sacudidas, pero aun así siguen siendo frágiles.

También cabe resaltar que su fabricación es más cara y dispone de una peor eficiencia en la gestión térmica, lo que supone un ciclo de vida más corto.

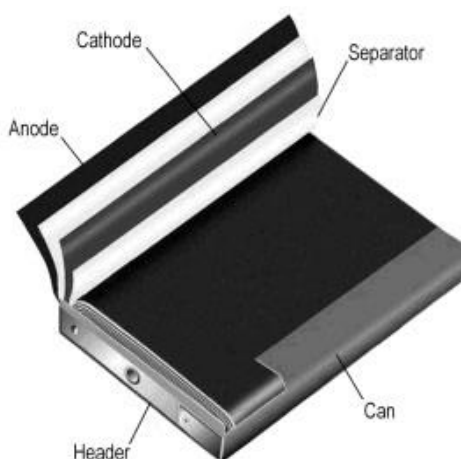


Figura 3.4. Sección de una celda prismática.

Fuente: Polystor Energy Corporation

A diferencia de las terminales de lengüetas delgadas, las prismáticas normalmente tienen terminales roscadas que permiten a las tuercas o tornillos ser usados para las conexiones.

Esto permite montar las celdas prismáticas más fácilmente para crear módulos de baterías más grandes. En almacenadores de energía de grandes dimensiones, como baterías para viviendas o vehículos eléctricos, se pueden usar grandes celdas prismáticas de 20 Ah a 100 Ah o más.

Tampoco hay dimensiones estandarizadas para las celdas prismáticas, pero normalmente están hechas con varias capacidades con incrementos de 5 a 10 Ah.

Celdas cilíndricas:

Las celdas cilíndricas son las más comunes y disponen de varios tamaños, algunas más comúnmente conocidas son las de tipo AA, usadas en aparatos electrónicos como mandos remotos o linternas. Todas las celdas cilíndricas comparten la misma forma y la carcasa metálica rígida pese a no ser del mismo tamaño.

Se producen enrollando el equivalente al mismo contenido que una celda de bolsa, solo que, a diferencia de estas últimas, las celdas cilíndricas se introducen dentro de una carcasa cilíndrica metálica con una terminal positiva y negativa en cada cara del cilindro. Estas celdas no son del todo eficientes en cuanto a espacio debido al enrollamiento de las

láminas interiores y la adición de la lámina metálica externa. Sin embargo, las celdas cilíndricas son las más robustas de todos los tipos de celdas de litio y no requieren ninguna estructura o carcasa externa.



Figura 3.5. Sección de una celda cilíndrica de iones de litio.

Fuente: Panasonic

De manera diferente a las anteriores celdas, las cilíndricas sí disponen de producción en tamaños estandarizados. La más común de las celdas cilíndricas de litio es la celda 18650, nombrada de esta manera por sus 18 mm de diámetro y sus 65 mm de longitud. Este tipo de celda cilíndrica es la más comúnmente utilizada en ordenadores portátiles, herramientas eléctricas, linternas y otros aparatos que requieren celdas de litio cilíndricas. Otros dos tipos de tamaños son las 14500, 14 mm de diámetro y 50 mm de longitud, siendo del mismo tamaño que las celdas estándar AA, así como las 26650, 26 mm diámetro y 65 mm de longitud. La 18650, que es por tanto la de tamaño intermedio entre las tres más comunes, es la más extendida y disponible en su uso por el mayor número de fabricantes.

3.3. TIPOS DE BATERÍAS DE LITIO

Las celdas de litio no están todas fabricadas de la misma manera. Hay diferentes tipos de composiciones químicas que difieren en sus especificaciones y propiedades, por lo tanto, todas ellas también tienen distintos tipos de ventajas y desventajas.

Ion de Litio (Li-ion):

La batería Li-ion es el tipo de batería más común, es usada en productos electrónicos tales como teléfonos móviles, herramientas eléctricas, ordenadores portátiles, etc. Tienen la mayor relación energía-peso y son también las que más densidad energética tienen, lo que se traduce en mayor cantidad de energía contenida en un menor volumen.

Dependiendo del tipo exacto de celda, las Li-ion son relativamente las más seguras, en cuanto a baterías de litio. Un riesgo que corren es su posibilidad de incendiarse, siempre y cuando se usen de manera negligente o se abuse de su utilidad. Un cortocircuito de la batería es ejemplo común de dicha negligencia.

Estas celdas también tienen relativamente largos ciclos de vida, aunque comparado con las otras alternativas se sitúa en un rango intermedio. Las más cortas se establecen en torno a 300 ciclos hasta que alcanzan el 70-80% de su capacidad de carga inicial, siendo las más

duraderas en torno a 1000 ciclos. Hay maneras de alargar esos ciclos, las cuales se desarrollarán más adelante.

Otro aspecto significativo a la hora de escoger los componentes es el coste. Este tipo de celdas están en un rango de precios intermedio comparado con el resto de las alternativas. Debido a la composición química el RC lipo es más barato y las constituidas por Fosfato de litio y hierro son más caras que las de Iones de litio.

En el aspecto en el cual resalta es en la disponibilidad, al ser el tipo de composición química más usada globalmente y la cual podemos encontrar en distintas formas, tamaños, capacidades y minúsculas variaciones químicas que tienen efecto en su rendimiento.

La mejor en cuanto a disponibilidad y facilidad de trabajo y por tanto la de nuestra elección, la celda cilíndrica 18650, es la más comúnmente usada en los productos OEM incluyendo desde herramientas de trabajo hasta vehículos eléctricos, habiéndose por tanto desarrollado un amplio abanico de especificaciones. Un ejemplo de ello puede ser la celda de Samsung ICR18650-26F, las cuales son perfectas para proyectos simples y de poca potencia, otro ejemplo como puede ser la celda de Sony US18650VTC5, dispone de aproximadamente la misma capacidad, peso y tamaño, pero destaca en su potencia, llegando a proveer un 600% más de potencia respecto a la anterior.

La mayoría de las celdas de iones de litio tienen una tensión nominal entre 3.6 V y 3.7 V y normalmente están clasificadas por su rango de carga y descarga de tensión entre 2.5 V y 4.2 V. También están clasificadas por su capacidad máxima en estos rangos de tensión de carga y descarga, pero es recomendable evitar bajar hasta 2.5 V muy a menudo ya que reduce su vida esperada. La mayoría de los BMS (Battery Management Systems) para las baterías de iones de litio cortan la descarga de cada celda en torno a los 2.7 V - 2.9 V. La descarga por debajo de 2.5V causaría un daño irreparable a la celda, ocasionando que esta no mantuviese su capacidad dada o su corriente de descarga catalogada.

De la misma manera y por efectos similares en la reducción de su vida además de peligroso, tampoco es recomendable cargar las celdas por encima de 4.2 V.

Hay distintos tipos de composiciones químicas distintivas dentro de la globalidad de las celdas de iones de litio. Todas tienen un único material de cátodo (terminal positivo) y comparten materiales similares o idénticos en algunos casos en el ánodo (terminal negativo). A continuación, aparecen listadas las distintas composiciones químicas de los iones de litio.

Óxido de manganeso y litio (LiMn₂O₄ o Li-manganeso):

Debe su nombre a la matriz estructural de manganeso que compone el cátodo. Desarrollado a finales de la década de los 70 y principio de los 80, fue una de las primeras composiciones químicas de iones de litio a la venta. Este tipo se caracteriza por poder gestionar relativamente alta potencia en cortas ráfagas y por su gran estabilidad térmica. Esto hace de ellas que sean una de las composiciones más seguras debido a que soporta altas temperaturas para las fugas térmicas.

Estas celdas también pueden ser ajustadas para altas potencias o capacidades a expensas de cada uno. Una desventaja respecto a otras estructuras químicas es el relativo ciclo de vida corto que tienen. Un ejemplo de estas es la celda LG 18650 HB2.

Óxido de cobalto y litio (LiCoO_2 o Li-cobalto):

Este tipo de composición química fue desarrollada a la par de la LiMn_2O_4 y también fue una de las más tempranas a la hora de ser comercialmente viable. Usa una estructura de cobalto por capas en el cátodo. Es conocida por su relativo bajo precio y alta capacidad, pero normalmente dispone de una clasificación de corriente más baja y un ciclo de vida moderado. También tiene una baja temperatura de fuga térmica, haciendo que sean menos seguras que otros tipos de composiciones. Un ejemplo de estas es la celda de Samsung ICR18650-26F.

Esta composición es la base de las baterías RC lipo, que son mucho más peligrosas. La composición química de estas es alterada para producir una celda mucho más potente capaz de mantener corrientes de descarga extremadamente altas. Aun así, esto provoca que tanto el peso como el ciclo de vida y principalmente la seguridad se vean comprometidos.

Óxido de cobalto, manganeso, níquel y litio (LiNiMnCoO_2 o NMC):

Esta composición química es bastante nueva la cual todavía está en desarrollo tratando de mejorar los inconvenientes de las anteriores composiciones químicas a la vez que mantiene sus beneficios. Las NMC comparten muchas de las ventajas de las LiCoO_2 y LiMn_2O_4 . Esta composición ha demostrado su relativa alta potencia, capacidad y seguridad.

Ajustando las cantidades o proporciones de cobalto, níquel y manganeso en el cátodo a la vez que incluir otros elementos en pequeñas cantidades tanto en el cátodo como en el ánodo, las celdas pueden ser mejoradas en los rendimientos de casi cualquier categoría de medición. Otras composiciones pueden tener mejores funcionamientos en alguna categoría, pero en la vista global las NMC son las más completas en cuanto a rendimiento y funcionamiento de todas las composiciones químicas de las baterías de iones de litio.

Un ejemplo de este tipo es la celda de Samsung INR18650-25R, la cual es optimizada para alcanzar potencias relativamente altas y capacidad media.

Óxido de aluminio, cobalto, níquel y litio (LiNiCoAlO_2 , NCA, o NCR):

Esta composición es muy parecida a la NCM, pero con la diferencia de aluminio en vez de manganeso en el cátodo. La adición de aluminio ayuda a las celdas de NCA a alcanzar la mayor de las capacidades de todas las composiciones químicas de iones de litio. Los inconvenientes son las ligeras disminuciones del ciclo de vida y potencia en comparación con la mayoría del resto de composiciones.

Un ejemplo de celda de NCA es la de Panasonic NCR18650B, las cuales fueron usadas por los primeros vehículos eléctricos de Tesla.

Al igual que la composición química NCM, la NCA es muy prometedora en el futuro desarrollo de las celdas de iones de litio. Esta es más conveniente para altas capacidades y propósitos densos en energía. Este es el motivo por el cual Tesla las eligió para sus vehículos eléctricos. Las NCA sobresalen en empaquetar la mayor energía en el menor espacio. Con una batería lo suficientemente grande, su menor potencia relativa puede ser mitigada. Sin embargo, el continuo estudio y las mejoras están ayudando a aumentar la potencia de este tipo de celda, haciéndola bastante competitiva con la NMC.

Polímero de litio (Li-poly, Lipo o RC Lipo):

El término original para las baterías de polímero de litio se refiere al uso de un electrolito sólido o a veces denominado seco, en comparación con el electrolito líquido o gelificado comúnmente usado. Dicho electrolito sólido era un polímero, o material plástico, proviniendo de ahí su nombre.

Este tipo de baterías en sus comienzos y su nueva tecnología prometían ser seguras, pero nunca se llegaron a comercializar a gran escala. El principal problema fue que el electrolito seco no conducía la electricidad lo suficientemente rápido a temperatura ambiente, por lo que debían de ser calentadas para su correcto funcionamiento.

Este tipo de baterías originario dio lugar a una nueva tecnología, celdas de polímero empaquetado o celdas de bolsa, también llamadas celdas de polímero de litio. Dicho nombramiento causó cierta confusión, ya que las celdas no tenían electrolitos de polímeros, sino que tenían sus electrolitos líquidos gelificados con el uso de un polímero externo. Realmente deberían ser llamadas baterías de polímero de iones de litio para ser distinguidas de las originales, las baterías de polímero de litio.

Otro aspecto reseñable es que su composición no dista de las celdas estándar de iones de litio que ya existían. Tienen el mismo o muy similares materiales para el cátodo y el ánodo y parecida cantidad de electrolitos. La principal diferencia es que las baterías de polímero de iones de litio se componen de un electrolito micro poroso en vez de la normal capa separadora porosa situada en el electrolito de las celdas de iones de litio.

Por lo tanto, ambas son técnicamente iguales, funcionan transportando iones de litio sin parar a través del electrolito. El término “lipo”, correspondiente a polímero de litio, es usado como referencia a la forma y al estilo de celdas, es decir las de bolsa, cuya bolsa es en sí un polímero. Así que las celdas de bolsa describen la forma, no la química de su interior, pudiendo variarse la composición interior de estas en un futuro o si se quisiese.

Otro tipo de celda comúnmente usada y nombrada como lipo es la de iones de litio para vehículos o juguetes radio control, baterías RC o “RC lipo”, tienen alta potencia y la habilidad de proveer muy alta intensidad. A su vez son muy peligrosas y requieren de un procedimiento correcto a la hora de carga y descarga para que sean seguras ya que pueden inflamarse al ser tan volátiles. Lo que hace a este tipo de celdas tan especial es su composición química basada en cobalto de litio que es adecuada para aplicaciones de alta potencia. Pueden proveer muy altas tasas de descarga durante largos periodos de tiempo a su vez que en cortos periodos de tiempo.

Este tipo de baterías se usan exclusivamente en vehículos radiocontrol tales como drones, helicópteros, aviones, coches, etc. Esto requiere que tasas de descarga muy altas para una batería ligera y pequeña, entregando alta potencia. Son las celdas más baratas dentro de las celdas de litio, pero disponen de un ciclo de vida muy corto. En torno a 200 ciclos sería considerado un buen rendimiento (considerando una correcta y completa carga y descarga de las baterías) pudiendo llegar hasta 300. Comparando con las Li-ion o las LiFePO₄ es una vida muy corta de la batería RC lipo. Otro problema es su complicado proceso de carga, comparado con las anteriormente nombradas sobre todo si se dispone de un BMS (Battery Management System), siendo necesarios cargadores más caros que equilibren y

aseguren que todas las celdas de la batería se mantienen a la tensión adecuada y equilibradas unas con otras.

La razón por la que sucede esto es que cuando las RC lipo fallan de su tasa de rango de tensión, se vuelven muy volátiles. Es muy importante que las celdas RC lipo sean cargadas dentro de su rango de tensión específico. Tampoco nunca deberían ser descargadas mucho, por debajo de 2.5 voltios y volviendo a cargarla de nuevo puede ocasionar una combustión de la celda, espacialmente en corrientes de carga elevadas. Por esta razón, deben ser manejadas cuidadosamente durante la descarga asegurándose que no se llegue a agotar su carga.

Es posible cargar celdas que hayan sido descargadas por debajo del valor de seguridad, pero debe de hacerse con corrientes muy bajas y puede resultar fácilmente en la aparición de fuego, dependiendo de lo dañada que este la batería.

Las celdas RC lipo son similares a las li-ion electroquímicamente hablando, y tienen una tensión nominal de 3.7 V. Siendo recomendable no descargarlas por debajo de 3.0 V y con el objetivo de que la mayor tensión sea 3.2 V para permanecer en el lado de la seguridad. La máxima tensión de estas celdas nunca debería sobrepasar de los 4.2 V.

Estos valores son considerados tensiones “bajo carga”. Dependiendo de la carga de corriente, cualquier batería de litio de cualquier composición química verá un descenso en la tensión. Este descenso es conocido como caída de tensión. Por lo que si la descarga se detuviese a 3.0 V bajo carga, la tensión una vez medida después de que la carga sea retirada volvería a una tensión más elevada, en torno al rango de 3.3 V - 3.5 V. Por ello es extremadamente importante la monitorización de dichas baterías a la hora de su carga y descarga.

Fosfato de hierro y litio (LiFePO₄):

Aun siendo un subconjunto de las baterías Li-ion son bastante únicas en su composición. Estas celdas son más pesadas y menores energéticamente densas que la mayoría de las Li-ion, lo que se traduce en que las baterías serán más voluminosas que las Li-ion o RC lipo de la misma capacidad y tensión, en torno a dos veces mayor tamaño y peso.

Las LiFePO₄ son también de las celdas más caras. Su coste varía conforme a diversos factores incluyendo el formato de la celda, su tamaño, vendedor y localización, siendo en torno a un 20% más caras que las celdas Li-ion de la misma capacidad.

Las más comunes tienen una baja tasa de descarga, lo que se traduce en que no pueden proveer mucha potencia, aunque no siempre es el caso. Algunas celdas, como pueden ser las fabricadas por la empresa de gran calidad A123, pueden proveer altos niveles de potencia, pero cuestan mucho y son difíciles de obtener. Estas son vendidas mayormente a las OEMs para su uso en productos como herramientas eléctricas.

Realmente hay dos grandes ventajas para el uso de las baterías LiFePO₄; su ciclo de vida y su seguridad. Estas son las que mayores ciclos soportan de todas las celdas de litio disponibles, llegando por encima de los 2000 ciclos. También tienen la composición química más segura, siendo escasas y raramente documentadas, las igniciones producidas por estas baterías. El electrolito usado simplemente no se puede oxidar lo suficientemente rápido para combustionar eficientemente y requiere temperaturas extremadamente altas

para que se produzca la fuga térmica, normalmente mayor que la temperatura de combustión de muchos materiales.

Estas celdas son ideales para proyectos que requieran altos ciclos de vida y gran seguridad, que no suponga ningún inconveniente las limitaciones de peso y espacio y no necesiten de muy altos niveles de potencia, a menos que específicamente se disponga de celdas LiFePO₄ de alta potencia.

Disponen de una tensión nominal de 3.2 V por celda y un rango de carga-descarga de tensión en torno a 2.5 V - 3.65 V. De igual manera que las celdas li-ion, descargarlas por debajo de 2.5 V causaría un daño irreparable a la celda, aunque estas no son peligrosas como las RC lipo.

A continuación, se expone una tabla a modo de resumen comparando los diversos tipos de composiciones químicas y sus características respectivas de las baterías de iones de litio:

Composición Química	Oxido de cobalto y litio	Oxido de manganeso y litio	Oxido de cobalto, manganeso, níquel y litio	Fosfato de hierro y litio	Oxido de aluminio, cobalto, níquel y litio
Abreviatura	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiCoAlO ₂ (NCA)
Tensión Nominal	3.60V	3.70V, 3.80V	3.60V, 3.70V	3.20V, 3.30V	3.60V
Carga completa	4.20V	4.20V	4.20V (o mayor)	3.65V	4.20V
Descarga completa	3.00V	3.00V	3.00V	2.50V	3.00V
Tensión mínima	2.50V	2.50V	2.50V	2.00V	2.50V
Energía específica	150– 200Wh/kg	100– 150Wh/kg	150– 220Wh/kg	90– 120Wh/kg	200– 260Wh/kg
Ratio de carga C	0.7–1C (3h)	0.7–1C (3h)	0.7–1C (3h)	1C (3h)	1C (3h)
Ratio de descarga	1C (1h)	1C	1–2C	1C	1C
Ciclos de vida (Ideal)	500–1000	300–700	1000–2000	1000–2000	500
Fuga Térmica	150°C	250°C	210°C	270°C	150°C
Estructura	Celda 18650,	Celda prismática	Celda 18650,	Celda 26650 y prismática	Celda 18650

	prismática y de bolsa		prismática y de bolsa		
Año de desarrollo	1991 (Sony)	1996	2008	1996	1999
Aplicaciones	Teléfonos móviles, tablets, ordenadores portátiles y cámaras	Herramientas eléctricas, aparatos médicos.	Bicicletas y vehículos eléctricos, aparatos médicos, uso industrial	Aparatos estacionarios con elevada intensidad y resistencia	Aparatos médicos, industriales y vehículos eléctricos (Tesla)
Comentarios	Elevada energía y potencia limitada. Mercado estabilizado	Elevada potencia y menor capacidad. Más seguro que LCO, habitualmente mezclado con NMC para mejorar rendimiento	Elevada capacidad y potencia. Mercado aumentando	Elevada potencia y baja capacidad, muy seguro y elevada auto descarga	La mayor capacidad con potencia moderada. Similar al LCO

Tabla 3.1. Tabla de las baterías de iones de litio más comunes.

Fuente: Elaboración propia

El mantenimiento en todos los tipos expuestos es similar: Mantenerlos a temperatura ambiente, almacenarlos parcialmente cargados, evitar ciclos de carga completa y usar corrientes moderadas de carga y descarga.

Hoy en día la tecnología más moderna respecto a las baterías de litio supera con creces a lo que actualmente se comercializa. Por lo tanto, en el futuro las propiedades descritas anteriormente cambiarán y mejorarán lentamente. Por ahora estas características descritas cubren las baterías que a día de hoy están a nuestra disposición en el mercado.

3.4. CICLO DE VIDA

El desecho de las baterías o celdas es un aspecto de gran importancia y consideración debido a su potencialidad contaminante. Estas nunca deberían ser tiradas al mismo contenedor de basuras de hogar una vez se gasten o se acabe su vida útil. España dispone de lugares adecuados para la deposición de las baterías agotadas, dicho esto, a nivel internacional las leyes de cada país varían para el desecho de baterías y para los materiales de los que estén compuestos.

En muchos de ellos las baterías de litio son consideradas residuos peligrosos, mientras que en otros es permisible el desecho de cantidades pequeñas en los residuos comunes.

También existen en otros la posibilidad de desechar cierta cantidad de baterías de litio de manera separada o ser enviados a lugares de reciclaje. De igual manera hay lugares en los cuales no hay ninguna ley existente que regule la deposición de este tipo de residuos.

En algunos lugares, las baterías de litio son recogidas de manera colectiva para proceder a incinerarlas de manera controlada, permitiendo prevenir que estas se acumulen en un vertedero y puedan provocar algún incendio.

En términos generales, el porcentaje de reciclaje de las baterías de iones de litio en Europa es muy bajo. En 2010, un estudio realizado por FoEE (Friends of the Earth Europe) concluía que solo el 5% aproximadamente eran reutilizadas [3].

Estos desechos no siempre están agotados, muchas de las baterías que se tiran aún pueden reutilizarse y es una opción más sostenible teniendo en cuenta que el litio es un recurso limitado y su extracción minera es cara.

En este país podemos encontrar basuras específicas de baterías de fácil acceso. Normalmente las encontramos ubicadas cerca de los colegios, universidades, bibliotecas y otros lugares públicos. Además, disponemos de “Puntos Limpios”, tanto móviles como fijos, que nos permiten a nivel municipal depositar aquellos residuos que no son comunes.

La deposición de estas baterías siempre debe realizarse correctamente. Para ello deben ser descargadas completamente o por debajo de su tasa mínima de tensión. Por último, las terminales deben ser cubiertas bien con plástico o cinta aislante para prevenir el riesgo de que se produzca un cortocircuito.

Dada la continua evolución de las baterías, muchas se quedan obsoletas produciendo gran cantidad de residuos [4]. Por tanto, siendo cada vez más evidente la transición de los vehículos convencionales a eléctricos, de cara al futuro el impacto y reciclaje de baterías va a ser un punto crucial en el cual se deberá hacer hincapié.

3.5. MARCO LEGAL

3.5.1. Autoabastecimiento en hogares

A día de hoy utilizamos energía eléctrica de la red, pero podemos almacenarla mediante el uso de baterías de iones de litio, a través de la red eléctrica de nuestros hogares o mediante paneles solares instalados en nuestras viviendas. Las baterías tienen variaciones económicas y en distintas escalas, desde sistemas de pocos vatios hora hasta otros sistemas de 10 kilovatios hora en nuestras viviendas. A pesar de esto también tienen sus debilidades, se degradan con el tiempo y pierden su eficiencia como se puede apreciar en nuestros teléfonos móviles, ya que no se pueden usar indefinidamente. Esta carencia es algo que la red eléctrica por medio de las centrales de generación sí podría soportar ya que la red está continuamente operando.

El autoconsumo consiste en la propia generación y consumición desde un mismo lugar o punto estando ambas partes relacionadas. Al tratarse generalmente de hogares o sistemas de poca cantidad de vatios y debido a la transición energética actual, suele desarrollarse mediante tecnologías de energía renovable. En los últimos años, el autoconsumo en España ha sufrido trabas a nivel legislativo, desde 2015 a 2018. Concretamente el 10 de

octubre de 2015 se consolidó el Real Decreto 900/2015 [5] para la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción de autoconsumo en este país, el conocido posteriormente como “Impuesto al sol”. En esta regulación se empiezan explicando aspectos favorables del autoconsumo y descentralización, haciendo hincapié en la reducción de pérdidas de la red y de la reducción del impacto que supondría. Después continúa explicando las cuestiones relativas al mantenimiento de las redes de transporte y distribución, afirmando que la generación distribuida no reduce dichos costes. Esta afirmación es debatible ya que la descentralización implica menores magnitudes de las redes de transporte, por lo tanto, menor coste de mantenimiento. Además, teniendo en cuenta las pérdidas por efecto Joule, a menor flujo de energía menores pérdidas se generarían. Más adelante el decreto especifica la obligación de los usuarios a abonar los mismos costes fijos que el resto de los usuarios o consumidores normales pese a realizar un menor uso, este apartado también incluye la disponibilidad del sistema en caso de necesidad, el coste de las redes y otros costes como las primas de generación por renovables.

El 5 de octubre de 2018 se publicó el Real Decreto-ley 15/2018 [6], debido a la polémica generada por el anterior. En el cuarto apartado del mismo, podemos observar lo siguiente: I) Se reconoce el derecho a auto consumir energía eléctrica sin cargos. II) Se reconoce el derecho al autoconsumo compartido por parte de uno o varios consumidores para aprovechar las economías de escala. III) Se introduce el principio de simplificación administrativa y técnica, especialmente para las instalaciones de pequeña potencia. Previamente a este Real Decreto-ley 15/2018, el Tribunal Constitucional en la Sentencia 68/2017 [7] invalidó la prohibición del Real Decreto 900/2015 contra el autoconsumo compartido, por lo que ya existía la posibilidad del segundo principio. Con este decreto se han retirado todos los cargos y peajes a la energía renovable además de las sanciones, que no están permitido que superen el 10% de la facturación anual de consumo de energía eléctrica o el 10% de la facturación de la energía vendida a la red.

Este nuevo decreto supone un sistema mucho más concienciado con la transición energética futura. Los plazos administrativos se han visto recortados a semanas, siendo anteriormente de hasta un año de duración.

3.5.2. Legislación actual

En los hogares o sistemas que dispongan de la posibilidad de autogeneración el balance neto indica la regulación entre el superávit y el déficit de generación. Es decir, en el caso de que la generación sea superior al consumo, el excedente es enviado de nuevo a la red con el fin de devolverlo a recuperar cuando la generación no sea suficiente, siendo en otros casos retribuida dicha generación por la red. El Real Decreto-ley 15/2018 a fin de incentivar el autoconsumo distribuido establece que la energía auto consumida de origen renovable, cogeneración o residuos está exenta de todo tipo de cargos y peajes. Además incluye cambios a la ley 24/2013 [8]. En el artículo noveno se define lo siguiente: “• Se define autoconsumo como aquel por parte de uno o varios consumidores en instalaciones cercanas y asociadas a ellos. • Se simplifica a dos tipos las instalaciones: con excedentes y sin excedente, dotando a las primeras de capacidad para verter energía a la red. • Las instalaciones sin excedente están exentas de obtener permiso de acceso y conexión de

instalaciones de generación en el caso de disponer ya de permiso de acceso y conexión para consumo. • El registro de autoconsumidores será muy simplificado, con una finalidad estadística (no administrativa) para realizar un seguimiento del proceso de implantación. Es más, si la potencia es inferior a los kW el registro se podrá realizar desde casa, sin tener que recurrir a trámites administrativos presenciales. • Reglamentariamente se pueden desarrollar mecanismos de compensación entre déficit y superávit de consumidores con excedentes en instalaciones de hasta 100 kW.” Este último punto hace referencia al balance neto comentado previamente y su posibilidad de regulación. Además, en el Real Decreto 900/2015 se limitaba la potencia instalada a la potencia contratada, aspecto el cual el nuevo decreto elimina.

El 5 de abril del 2019 es publicado el Real Decreto 244/2019 [9], regulándose los aspectos administrativos, técnicos y económicos del autoconsumo de energía eléctrica. Hace referencia a las necesidades expuestas en el Real Decreto-ley de 2018 para la compensación del balance neto en las instalaciones de hasta 100 kW. En cuanto al reglamento electrotécnico de baja tensión ITC-BT-40, este es modificado con respecto a los sistemas antivertido y aspectos de seguridad.

En el capítulo VI, relativo a los peajes de acceso, se establece que por verter energía a la red las instalaciones con excedentes deben satisfacer los peajes establecidos en el Real Decreto 1544/2011 [10] por la energía horaria vertida. Además, la energía autoconsumida generada por métodos renovables, cogeneración o residuos permanece exenta de peajes. En el artículo 14, se establece que el sistema de compensación simplificada es un saldo económico. En el caso de tener el contrato al precio voluntario para el pequeño consumidor con una comercializadora de referencia, la energía consumida de la red es valorada al coste horario de energía del precio voluntario que se define en el artículo 7 del Real Decreto 216/2014 [11]. Por otro lado, en el caso de disponer de un contrato con una comercializadora libre, la energía consumida de la red y la excedentaria son valoradas al precio horario que es acordado respectivamente. También, la energía excedente es valorada al precio medio horario a partir de los resultados de los mercados diarios e intradiarios. El valor económico de la energía excedentaria no puede superar el valor de consumo en ninguno de los casos.

4. METODOLOGÍA

Partiendo de la base de referencia de la batería Tesla Powerwall, como se ha comentado, el objetivo de este trabajo es establecer los criterios básicos que definen una batería, para que consecuentemente se pueda fijar una relación conforme a las características definidas, el proceso de construcción y el margen de presupuesto aproximado que tiene como fin en este estudio.

Para ello se comienza destacando los aspectos claves a considerar a la hora de diseñar un prototipo de batería, parámetros que la definen, precauciones y consideraciones a tener en cuenta en los cálculos. Por otra parte, el conocimiento de las alternativas en el mercado nos ayuda a enfocar las tecnologías existentes hoy en día y establece una ruta para determinar y comparar aspectos esenciales como puede ser el tipo de baterías o celdas que son utilizadas.

Tras esta comparación y apoyándose en la tecnología utilizada por Tesla, se procede a hacer una estimación mediante cálculos del dimensionamiento de la batería. Se determina un procedimiento de construcción detallando los componentes a utilizar, tratando de realizarlo con materiales y componentes fácilmente asequibles en el mercado, encontrando precios razonables, y que supongan el menor riesgo posible sin perder calidad y fiabilidad en los productos seleccionados.

Por último y tras estimar el precio total, se procederá a evaluar y comparar el conjunto de la batería obtenida con la Powerwall de Tesla.

4.1. PARÁMETROS QUE DEFINEN UNA BATERÍA

La clasificación y parámetros de las baterías de litio abarcan un gran campo, por lo que a continuación se tienen en consideración las más importantes [12].

Capacidad:

Este parámetro de las baterías es sin duda el más importante ya que determina la cantidad de energía que es recogida en la celda. La capacidad en las baterías de litio es medida en amperios hora (Ah), incluso a veces en miliamperios hora (mAh). El rango de capacidades en una batería varía desde pocos miliamperios hora hasta por encima de cien amperios hora.

Un aspecto a considerar es que en las celdas las unidades que normalmente las acompañan son los watios hora (Wh), otra unidad de energía, pero que en este caso tiene en cuenta la tensión. En este caso para determinar los amperios hora, solamente es necesario dividir los watios hora entre la tensión nominal de la celda.

La capacidad es indicativa de cuanta energía puede almacenar y proveer una celda, pero nunca de la potencia o su vida útil. Normalmente las baterías de mayor capacidad disponen de niveles de potencia moderados, es decir, existe una compensación entre potencia y capacidad.

Otra consideración a tener en cuenta es que las celdas nunca van a alcanzar su capacidad nominal. Es muy común por parte de los fabricantes evaluar la capacidad de sus celdas a una tasa de descarga muy baja, en torno a 0.2 C, para sacar la mayor capacidad posible.

También descargan las celdas hasta su mínima tensión nominal, normalmente 2.5 V en celdas Li-ion. Hacer esto muy a menudo es contraproducente ya que hace que la vida útil disminuya. La mayoría de los dispositivos que se comercializan solo descargan las celdas hasta 3.0 V, para aumentar la vida de estas.

Numero de ciclos máximo:

Dependiendo del tipo de batería de litio, el rango de número de ciclos puede ir desde 200 hasta 3000 aproximadamente. La evaluación de los ciclos a la hora de comparar celdas es difícil debido a que los fabricantes no siempre utilizan un sistema estándar de evaluación.

El modo más común de evaluación es el número de ciclos antes de que la celda alcance el 80% de su capacidad nominal... La capacidad de las celdas de litio va disminuyendo a lo largo del tiempo a medida que se aumentan los ciclos de carga. Al 80% de su capacidad nominal original, muchos fabricantes estiman y por lo tanto consideran que la celda ha alcanzado el fin de su vida útil. En cambio, otros fabricantes consideran el 70% hasta que alcance el fin de vida útil. Algunos incluso no llegan a especificar el porcentaje que consideran, estableciendo solamente un numero de ciclos hasta el fin de su vida útil.

De todas maneras, que una celda alcance el 80% o el 70% de su capacidad nominal no significa que no vaya a funcionar, simplemente no lo hará en sus plenas condiciones. Por lo tanto, técnicamente se traduce en una menor capacidad, una mayor caída de tensión y por consiguiente una menor potencia y tiempo de funcionamiento de la celda.

Tasa de descarga máxima:

Este parámetro contribuye a indicar la carga máxima, es decir, la corriente máxima que puede ser extraída de la celda. Dentro de esta tasa de descarga podemos diferenciar dos que son comunes, la “corriente de descarga continua máxima” y la “corriente de descarga de pico máxima”. A la hora de comparar celdas es mejor usar la corriente de descarga continua máxima. Esta es la máxima corriente que la celda puede proveer continuamente sin dañarse o sobrecalentarse, desde su estado de carga completa hasta que se vacíe.

La corriente de descarga de pico máxima es la cantidad de corriente que la celda puede entregar en un tiempo corto. Este valor es más difícil de usar a la hora de comparar debido a que los fabricantes consideran en algunos casos periodos de tiempo de 2 a 3 segundos y en otros casos hasta 10 segundos para el pico máximo.

Debido a que los fabricantes tasan sus celdas al límite de lo que son capaces, es necesario tener en cuenta el no sobrepasar dichos límites. Es más, las baterías que trabajan cerca de sus tasas límite, tienden a operar ineficientemente y con una alta temperatura, suponiendo un descenso del hasta 10% de su capacidad diseñada. Por lo que es mejor no trabajar con las baterías en esos rangos o tasas límite si se quiere operar con la plena capacidad.

Tasa de carga C:

Esta medida especifica el rango en el cual la celda puede ser cargada o descargada en función de la capacidad de esta. Al ser una propiedad intrínseca de la batería, la tasa C no cambia en función de la capacidad de la celda. Esto se traduce en que si dos celdas son iguales completamente excepto en su capacidad nominal ambas tendrán idéntica tasa de carga C. La tasa C se obtiene al dividir la corriente máxima de descarga (A) entre la

capacidad (Ah). Una tasa de 1C significa que la corriente de descarga acabaría descargando la batería por completo en una hora.

Esta tasa se usa para comparar la potencia relativa entre celdas, incluso cuando tienen distintas especificaciones. Normalmente las celdas de litio se encuentran a la hora de comprarlas solamente con la tasa de carga C y no con la tasa de corriente máxima. Sabiendo su capacidad nominal, se puede saber rápidamente su tasa de corriente máxima.

Tasa de carga máxima:

Este parámetro es bastante similar a la tasa de descarga máxima, solamente que es la máxima tasa a la que se puede cargar la celda. La mayoría de las celdas tienen una tasa de carga de alrededor de 0.5C. Cargar la celda alrededor de su tasa de carga máxima hará que la vida esperada de esta disminuya. Para ello es recomendable no cargar las celdas de litio por encima de 0.5C, siendo mucho mejor hacerlo alrededor de 0.2C.

Por ejemplo, una celda de 5 Ah cargada a 0.5 C estaría cargada a 2.5 A, sin embargo, una celda de 2.5 Ah cargada a 2.5 A, supondría una tasa de carga de 1C, suponiendo una carga excesivamente rápida según los estándares de baterías de litio.

Resistencia interna:

La resistencia interna proporciona información útil sobre una batería, ya que una lectura alta indica el final de la vida útil de esta y cuando debe de ser reemplazada.

Pese a esto, la resistencia no posee una relación proporcional ni lineal con la capacidad, como bien se puede comprobar en la siguiente Figura 7. La resistencia interna de la batería no revela del todo el estado de la batería, ya que normalmente esta se suele mantener constante aproximadamente con el tiempo y solo indica el envejecimiento y un posible fallo en caso de ser elevada.

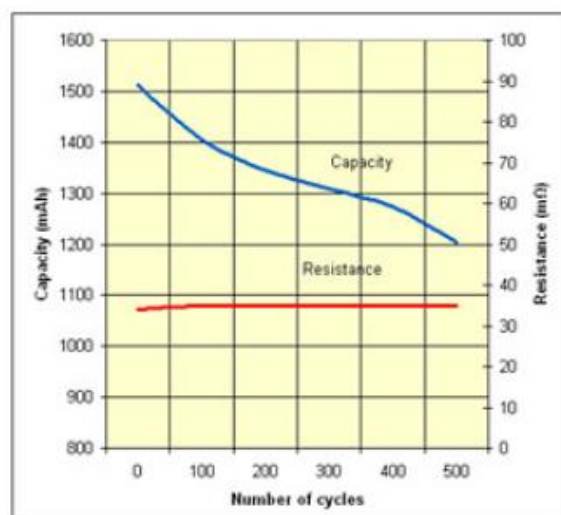


Figura 4.1. Relación entre la capacidad y la resistencia como resultado del número de ciclos de la batería.

Fuente: Battery University

4.2. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN RESPECTO A OTRAS ALTERNATIVAS

Para ver la situación actual de la celda 18650 y su relevancia es necesario hacer una comparativa con las diferentes propuestas que a día de hoy hay en el mercado.

El referente principal que se ha utilizado en este proyecto es la empresa Tesla, la cual ha impulsado la producción y desarrollo de este campo causando una gran y prometedora revolución junto con Panasonic, un referente en baterías a escala global.

En 2017, Tesla empezó a producir el nuevo formato de celda 21700 para sus vehículos que desarrolló con Panasonic. Este modelo es ligeramente más grande y tiene un mayor aumento de capacidad y densidad energética comparado con la 18650, que utilizaba anteriormente. Debido a esto, la obtención de este tipo de celdas es bastante complicada ya que es una tecnología exclusiva de Tesla.

También hay otro formato de pilas cilíndricas LiFePO4 creadas por la compañía Headway disponibles en dos modelos 38120 y 40152, 38mm diámetro, 120 mm de longitud y 40 mm diámetro y 152 de longitud, respectivamente. Estas son de mayor tamaño y por tanto mayor capacidad que las 18650. Lo que las distingue de las demás, es que son las únicas que tienen terminales atornilladas para realizar conexiones más sencillas, mientras que el resto de las pilas cilíndricas deben ser soldadas por puntos para conectar unas a otras.

Otros fabricantes como Samsung, CATL, Panasonic o LG Chem, siguen fabricando celdas 18650 para sus productos.

A medida que se vayan implementando e introduciendo en el día a día las nuevas tecnologías relacionadas con las baterías, ya sean, vehículos eléctricos comerciales o personales, almacenadores de energía en hogares o productos electrónicos, la capacidad y volumen de fabricación se verá incrementado.

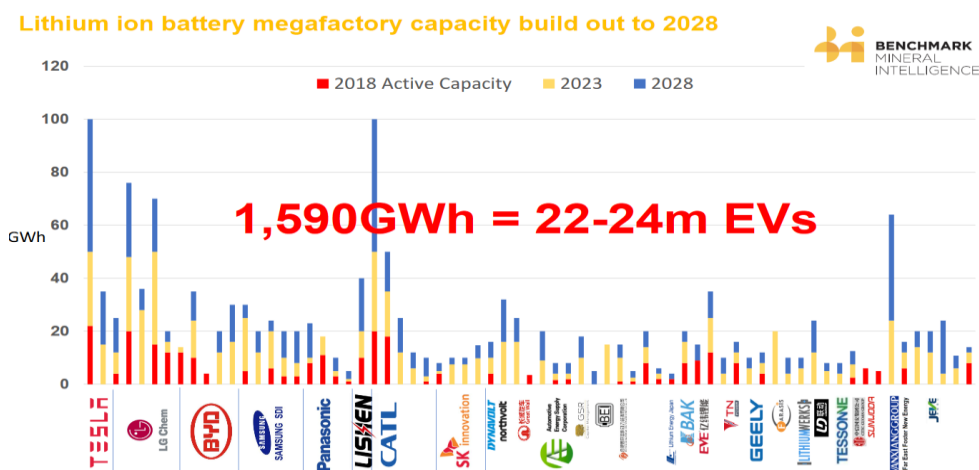


Figura 4.2. Capacidad de energía de mega factorías de baterías de iones de litio.

Fuente: Benchmark Mineral Intelligence

En el grafico se puede observar las megas factorías actuales (rojo), las que están planeadas para 2023 (amarillo) y las planeadas para 2028 (azul). Las mayores expansiones

se pueden observar en empresas tales como; Tesla, LG Chem, CATL, y Wanxiang Group. También otras empresas significativas son BYD Co., Samsung SDI, EVE y J EVE.

En definitiva, la capacidad total de energía se verá incrementada en los próximos años, contribuyendo así en el desarrollo de nuevas baterías y tecnologías.

Las celdas son el elemento esencial dentro de una batería, por ello a continuación, se procede a ampliar las características del conjunto de una batería mostrando una tabla comparativa en la cual se analizan los aspectos más reseñables a la hora de escoger la batería idónea mostrando cuatro de las baterías más importantes en el mercado actualmente:





Nombre	BYD B Box Pro 13.8	LG Chem RESU 13	Sonnenbatterie Eco 9.43	Tesla Powerwall 2
Imagen				
Tipo de batería	Iones de litio (Fosfato de hierro y litio)	Iones de litio (NMC)	Iones de litio (Fosfato de hierro y litio)	Iones de litio (NMC)
Inversor	No	No	Incluye inversor de batería AC pero requiere inversor solar	Incluye inversor de batería AC pero requiere inversor solar
Capacidad nominal	13.8 kWh	13.1 kWh	15kWh	14 kWh
Capacidad nominal usable	13.8 kWh	12.4 kWh	13.5kWh	13.5 kWh
Pros	Posibilidad de conexión en paralelo entre baterías	Sistema compacto y posibilidad de conexión por modulos	Gran ciclo de vida y garantía	Gran seguridad y garantía frente a problemas de incendio.
Contras	El rango de temperatura óptimo hace que sea una opción poco idónea para climas extremos	Batería garantizada para 45�C ambiente	Baja output de potencia relativa – max 3.3kW	Es posible que la batería de 13.5 kWh no se cargue completamente durante los meses de invierno
Potencia	12.8kW	5kW	3.3kW	5kW continuo, 7kW pico (10 segundos)
Dimensiones	65 cm x 80 cm x 55cm	45.2cm x 62.6cm x 22.7 cm	67cm x 186cm x 23cm	115 cm x 75 cm x 15cm
Eficiencia	�95.5%	95%	95%	90%
Diseñado para dentro o fuera del hogar (Clasificación IP)	Dentro (IP 20)	Dentro/Fuera (IP 55)	Dentro (IP 30)	Dentro/Fuera (IP 67 para la batería y electronica, IP56 para cableado)
Rango de temperaturas de operación	-10 �C to +50�C	-10�C to 45�C	-5�C to 45 �C	-20�C to 50�C
Acoplado AC o DC	N/A	N/A	AC/DC	AC
kWh Totales garantizados (1 ciclo por día)	43,400	39,000	49,275	37,8
Coste por kWh Totales garantizados (1 ciclo por día)	\$0.22 (+ coste del inversor)	\$0.24 (+ coste del inversor)	\$0.34	\$0.31

Tabla 4.1. Comparativa de baterías principales en el mercado actual.

Fuente: Elaboración Propia

Observando la tabla y tras haber identificado como modelo más fiable y de mejores características la batería Powerwall 2 de Tesla, principalmente por su seguridad y garantía, he decidido tomar como referencia en mi diseño esta batería para llevar a cabo la elaboración de esta.

Algunas de sus características principales en el modelo de diseño estadounidense [13] son:

- Tensión de CA (nominal): 120/240 V
- Tipo alimentación: Fase dividida
- Frecuencia de la red: 60 Hz
- Energía total: 14 kWh
- Energía utilizable¹: 13,5 kWh
- Potencia real, máx. continua: 5 kW (carga y descarga)
- Potencia real, pico (10 s, off-grid/reserva): 7 kW (carga y descarga)
- Potencia aparente, máx. continua: 5,8 kVA (carga y descarga)
- Potencia aparente, pico (10 s, off-grid/reserva): 7,2 kVA (carga y descarga)
- Corriente de avería de suministro máxima: 10 kA
- Corriente de avería de salida máxima: 32 A
- Dispositivo de protección contra sobreintensidad: 30 A
- Desequilibrio para cargas de fase dividida: 100 %
- Intervalo de salida del factor de potencia: ajustable en $\pm 1,0$
- Intervalo del factor de potencia (máxima potencia nominal): $\pm 0,85$
- Tensión de CC de la batería interna: 50 V
- Eficiencia de ida y vuelta¹: 90 %
- Garantía: 10 años

¹Valores proporcionados para 25 °C y potencia de carga/descarga de 3,3 kW.

En el siguiente capítulo se desarrollará el análisis de la construcción de la batería, especificando sus características técnicas comparadas con la batería Powerwall 2 de Tesla.

4.3. ELECCIÓN

Para seleccionar correctamente una batería se debe elegir el tipo de estructura y la construcción o tecnología interna conforme a los requisitos y características que queramos que prevalezcan. Al igual que esto último, es muy importante hacer el correcto dimensionamiento de la batería, es decir, determinar tanto el número de celdas como la capacidad de las mismas.

Debemos tener en cuenta varios aspectos determinantes una vez hayamos decidido la batería a utilizar:

- La aplicación para la que va a ser llevada a cabo.
- La ubicación física para su correcto mantenimiento periódico.
- Las condiciones ambientales, para determinar la temperatura y ventilación que se disponen.
- Las características físicas de la batería, para saber si se dispone del espacio requerido para su instalación.
- Las condiciones de recarga de la batería.

Respecto a la comparación y estudio realizado de los distintos tipos de celdas que disponemos hoy en día en el mercado, se ha valorado como la solución óptima la realización de la batería a base de celdas 18650. Este tipo de celdas son más pequeñas y fáciles de conseguir. Aunque si es cierto que son más complejas a la hora de realizar conexiones y montaje.

De manera diferente a las anteriores celdas, las cilíndricas sí disponen de producción en tamaños estandarizados. La celda cilíndrica de litio más común es la celda 18650, nombrada de esta manera por sus 18 mm de diámetro y sus 65 mm de longitud. Este tipo de celda es la más común en ordenadores portátiles, herramientas eléctricas, linternas y otros aparatos que requieren de celdas de iones de litio cilíndricas. Otros dos tipos de tamaños de celdas cilíndricas son las 14500, 14 mm de diámetro y 50 mm de longitud, estas son del mismo tamaño que las baterías estándar AA, así como las 26650, 26 mm diámetro y 65 mm de longitud. La 18650, que es por tanto la de tamaño intermedio de las tres más comunes, es la más extendida y disponible dado a su uso por gran cantidad de fabricantes.

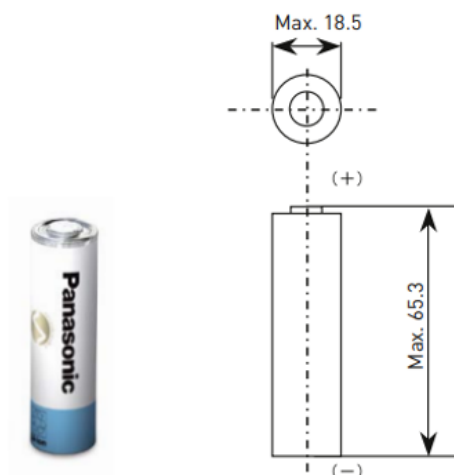


Figura 4.3. Dimensiones de la celda Panasonic NCR18650B (mm).

Fuente: Panasonic

Parámetros	Valor	Unidades
Tensión nominal	3.6	V
Capacidad nominal ¹ - Mínima	3.250	Ah
Capacidad nominal ¹ - Típica	3.4	Ah
Dimensiones (Diámetro x Altura)	18.5Ø x 65.3 l	mm
Resistencia interna	0.11	Ω
Peso aproximado	47.5	g

¹Carga: Tensión constante / Intensidad constante, 4.2V, máx. 1,625mA, 65mA de corte; Descarga: Intensidad constante, 650mA, 2.5V de corte; Temperatura: 25°C

Temperatura de almacenamiento	-20 ~+50	°C
Material	INR/NCA o Li-aluminio	

Tabla 4.2. Especificaciones de la celda NCR18650B.

Fuente: Panasonic

Los aspectos más importantes que han condicionado la elección de este tipo de celda además de que posea una larga duración o cuanta potencia sea capaz de suministrar son los siguientes:

- Capacidad y Potencia
- Profundidad de descarga
- Eficiencia
- Vida de la batería y garantía
- Fabricante

También se han valorado las posibilidades de uso de distintos tipos de baterías según su composición química.

Como se puede contemplar en la siguiente Figura 4.4., de cara al futuro se estima que las nuevas tecnologías permitan aumentar la densidad energética reduciendo costes. Por lo tanto, en los próximos años se podrán presenciar nuevos modelos de celdas capaces de satisfacer las necesidades del usuario y de las empresas de manera más eficiente.

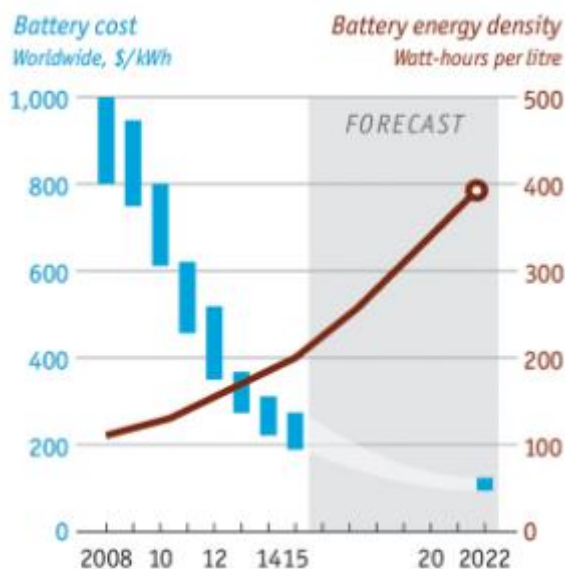


Figura 4.4. Evolución de la relación entre el coste de las baterías y su densidad energética.

Fuente: Departamento de Energía de EE. UU.

En este caso, las celdas 18650 ofrecen menores costes por vatio hora y tienen buenos registros de fiabilidad en comparación a las otras alternativas anteriormente expuestas.

Por ello se ha elegido como referencia la celda 18650 de Panasonic, empresa colaboradora con Tesla en la fabricación de baterías.

El aumento de la densidad de energía aumenta el riesgo de sobrecalentamiento e ignición debido a cortocircuitos internos. Panasonic utiliza la tecnología de capa de resistencia al calor (HRL) para mejorar significativamente la seguridad de las baterías de iones de litio. Esta capa de resistencia al calor consiste en un aislante de óxido de metal en la superficie de los electrodos que evita que la batería se sobrecaliente si se produce un cortocircuito interno.

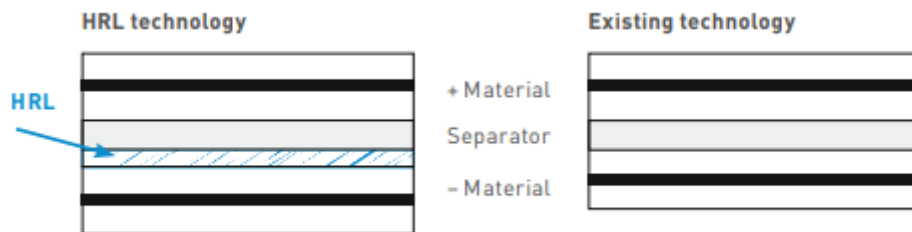


Figura 4.5. Tecnología de capa de resistencia al calor (HRL).

Fuente: Panasonic [14].

En la siguiente Figura 4.6. podemos observar las diferentes especificaciones y parámetros de un modelo 18650 de Panasonic, así como las características testeadas de carga, descarga, y ciclo de vida. Como ya he mencionado anteriormente, todos estos aspectos dependen de los rangos de temperatura a los que trabaje la celda.

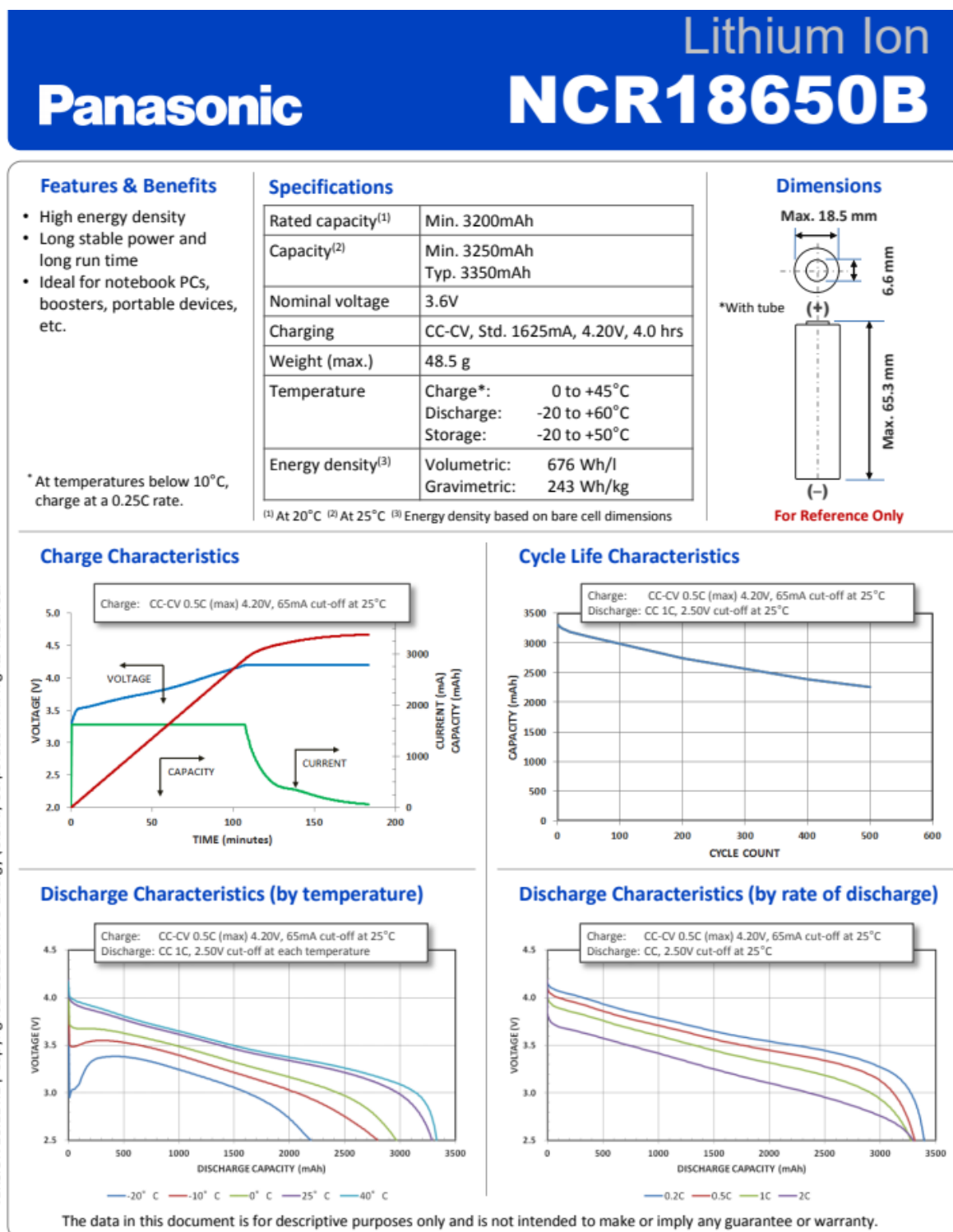


Figura 4.6. Especificaciones y parámetros de la celda Panasonic de iones de litio NCR18650B.

Fuente: Panasonic

- Carga:

En la Figura 13, se observan las características de carga para 25  C. La línea verde representa el valor de la corriente. Se observa que a medida que aumenta la tensión de la celda (su estado de carga) llega un punto en el cual la corriente disminuye de manera muy drástica. Esto indica que durante un gran porcentaje de tiempo (hasta los 110 min aprox.) la celda se carga de manera constante, pero para completar su carga al 100% necesita más tiempo (hasta los 180 min aprox.). En términos de capacidad podemos observar que en este punto clave la batería estaría cargada aproximadamente un 85%.

Charge Characteristics

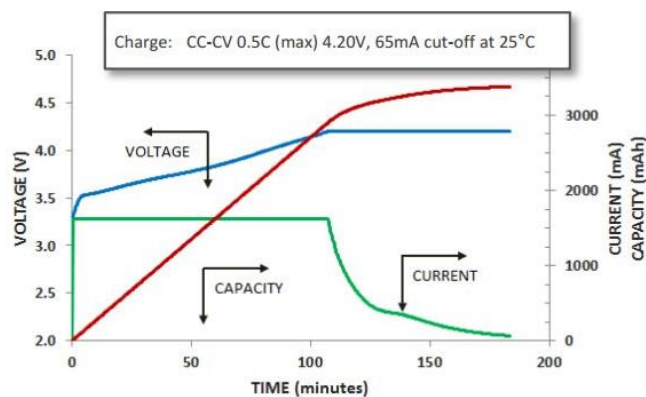


Figura 4.7. Características de carga (Panasonic NCR18650).

Fuente: Panasonic

De igual manera se puede observar la ligera variación que se produce dependiendo de la temperatura de carga para 0  C y 40 C.

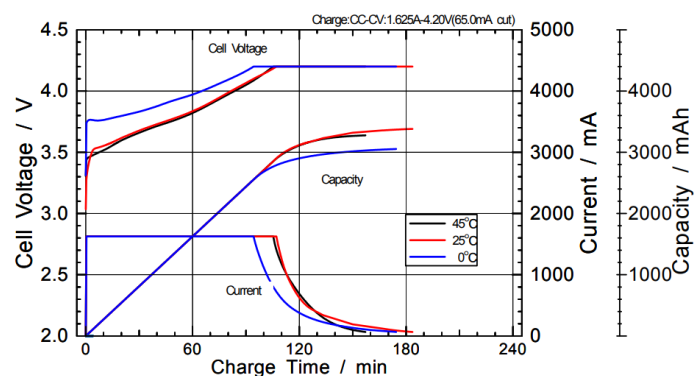


Figura 4.8. Características de carga en función de la temperatura.

Fuente: Panasonic

- Descarga en función de la temperatura:

En esta grafica podemos observar como la temperatura afecta de manera negativa a las celdas. A menor temperatura, la capacidad de la celda se ve afectada de mayor manera. A una temperatura de -20 C, la capacidad de la celda es en torno a 2200 mAh, mientras que a 40 C la capacidad alcanza los 3300 mAh. Pese a tener mayor capacidad a mayor

temperatura esto no implica que debamos tener la celda trabajando a altas temperaturas porque la degradación de estas a altas temperaturas es un factor importante a tener en cuenta. Tesla recomienda un rango de temperaturas de operación óptimo de 0 a 30 °C (13).

Discharge Characteristics (by temperature)

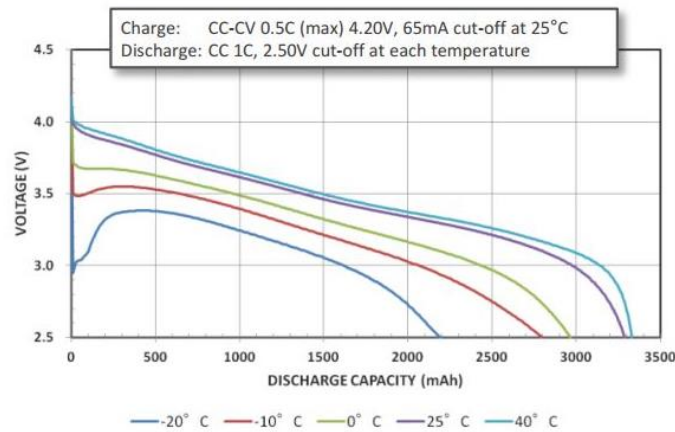


Figura 4.9. Características de descarga en función de la temperatura (Panasonic NCR18650).

Fuente: Panasonic

- Descarga en función al ratio o tasa de descarga:

La capacidad aparte de depender de la temperatura también depende de la tasa de descarga. En la gráfica se observa que la capacidad de la celda descargada a 0.2C en comparación con 2C, es ligeramente mayor. A 2C, la demanda de potencia es mayor por lo que influye de manera negativa en la autonomía de la celda y en su comportamiento.

Otro aspecto a tener en cuenta es que es necesario aplicar un porcentaje de seguridad a las celdas limitando su descarga con la finalidad de alargar su vida útil.

Discharge Characteristics (by rate of discharge)

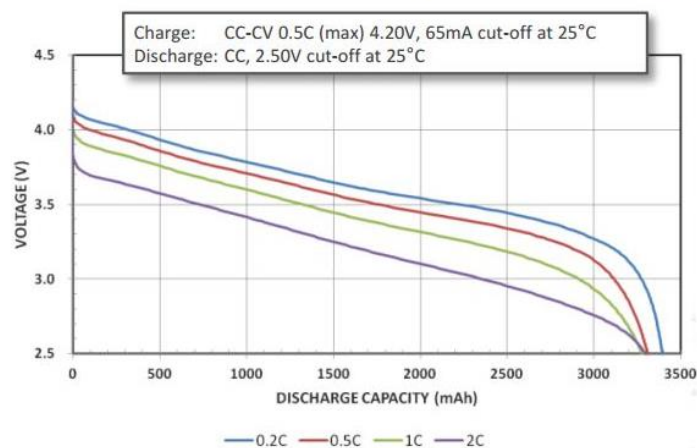


Figura 4.10. Características de descarga en función del ratio de descarga (Panasonic NCR18650).

Fuente: Panasonic

- Vida  til:

En la gráfica se muestra la capacidad de la batería en función del número de ciclos.

Un ciclo se traduce en usar el 100% de la energía de la celda o batería y después volver a cargarla. Este ciclo puede darse de diversas formas, por ejemplo, dos descargas hasta el 50% o bien por tres descargas del 66.6%.

Observando la gráfica, la celda con capacidad inicial de 3300 mAh al término de realizar 500 ciclos acabaría por tener 2300 mAh de capacidad, lo que se traduce en un 30% menos.

Como se ha comentado previamente, hay que tener en cuenta los márgenes de seguridad establecidos, que evitan la descarga completa y alargan la vida útil.

Trasladando esto a nuestra batería, estas celdas con gran número de ciclos en las cuales la capacidad ha disminuido serán las que se usarán para conformar el conjunto y los módulos.

Cycle Life Characteristics

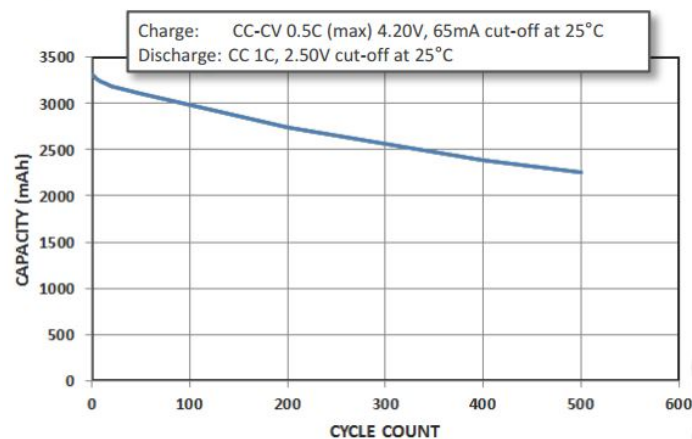


Figura 4.11. Características de vida útil (Panasonic NCR18650).

Fuente: Panasonic

Por último, cabe recalcar que la salud de una batería se basa en estos tres atributos fundamentales y por lo tanto su vida útil:

- Capacidad, la capacidad de almacenar energía es el principal indicador de salud de una batería.
- Resistencia interna, la capacidad de entregar corriente.
- Autodescarga, indicador principal de la integridad mecánica.

5. CONSTRUCCIÓN

Durante el proceso de fabricación de las celdas es obligada la realización de comprobaciones continuas por parte de la empresa. Principalmente en la etapa final del proceso se llevan a cabo tres pruebas o comprobaciones esenciales antes de su comercialización en el mercado: capacidad, resistencia interna y voltaje.

Para garantizar la precisión de la prueba de capacidad, se requieren cinco ciclos de pruebas de envejecimiento para seleccionar las celdas que no funcionen correctamente o dispongan de una capacidad baja. Para ello se utilizan pruebas de carga y descarga de 0.2C. Se cargan con la corriente adecuada con la limitación de corte de tensión a 4.20 V (la versión de alto voltaje debe cargarse a 4.30 V o 4.35 V), después se espera durante un período de tiempo (más de 15 minutos) para que la temperatura de la batería esté cerca de la temperatura ambiente y la polarización dentro de la batería se disipe.

La prueba utiliza una descarga de 0.2C a un voltaje de 2.75V para lograr la capacidad marcada y para que se considere apta.

En cuanto a la resistencia interna la fábrica dispone de máquinas automáticas de resistencia interna que pueden agilizar el proceso. Para las celdas 18650, si su resistencia interna se encuentra en el rango de 70 miliohmios, son consideradas aptas.

La última comprobación es el voltaje de la batería, el cual debe encontrarse en el rango de $3.6V \pm 0.05$, lo cual es conveniente para conexión en paralelo o conexión en serie.

Además de dichas pruebas, cada lote de celdas también debe realizar docenas de pruebas mecánicas, como impacto, vibración y perforación, para eliminar los peligros potenciales y garantizar la mejor calidad de cada lote [15].

Estas tres características son fundamentales en las celdas, por ello previamente a construir el módulo, la comprobación mediante el instrumental adecuado va a ser un requisito obligatorio, ya que va a garantizar un uso y manipulación segura con la cual vamos a poder establecer unos requisitos mínimos de seguridad para nuestra batería, evitando de esta manera posibles accidentes.

5.1. PARTES PRINCIPALES

En este capítulo los componentes han sido buscados y seleccionados en la red evaluando distintas alternativas en el caso en el que los precios de estos componentes o dispositivos suponían un coste relativamente elevado, escogiendo de esta manera los que suponían un bajo coste sin perder de vista la calidad y garantía de estos.

5.1.1. Celdas

Las agrupaciones de las baterías se determinan de la siguiente manera, la unidad elemental es la celda y la agrupación de estas conforma un módulo, paquete o envase “pack”.



Figura 5.1. Celda Panasonic NCR18650B.

Fuente: Panasonic

La construcción de paquetes de baterías de litio se lleva a cabo mediante la agrupación de celdas, pudiendo obtenerse distintas tensiones y capacidades. La manera de combinar o agrupar estas celdas determinan las especificaciones resultantes de cada pack.

Las celdas individuales de iones de litio, Li-ion, normalmente tienen una tensión nominal de 3.6 V. Para poder alcanzar las necesidades de una batería para una vivienda es necesario aumentar dicha tensión mediante la conexión en serie de estas, la terminal positiva de una celda unida a la negativa de la siguiente celda.

Bien cabe recordar que, al tratarse de tensión nominal, hay que tener en cuenta que una simple celda puede ser cargada hasta 4.2 V y descargada hasta 2.5V, lo que es un gran rango teniendo en cuenta considerando 14 módulos en serie para nuestra batería.

La conexión en serie no afecta a la capacidad de las baterías, solo aumenta la tensión o voltaje. Para incrementar la capacidad deben ser conectadas las celdas, dentro de un módulo, en paralelo, es decir conectando las terminales positivas de las celdas juntas y las negativas de igual manera, al juntarse y compartir las mismas terminales se comportan como una celda o batería de mayor capacidad.

Para conectar un número de celdas en paralelo hay que asegurarse de que tengan la misma tensión. De no ser así, si la diferencia de tensiones de una celda a otra es mucho mayor, la de mayor tensión tratara de cargar la de menor tensión, depositando en esta última una gran cantidad de energía en poco tiempo y corriendo el riesgo de que se sobrecaliente y pueda inflamarse. Esta alta intensidad resultara en la avería de ambas celdas.

La capacidad de las celdas conectadas en paralelo es directamente proporcional al número de ellas que lo conformen y a su capacidad. Teniendo en cuenta que a cada celda le corresponden 3.6 V y 3.5 Ah, la agrupación en paralelo de estas dispondrá de la misma tensión y de la capacidad correspondiente al número de ellas.

Para una batería de almacenamiento en el hogar, se requiere una batería en la que tanto la tensión como la capacidad sean elevadas. Para ello será necesaria la conexión en serie-paralelo de las celdas. La realización de esta conexión se hace a partir de grupos de celdas en paralelo uniéndolos en serie con el siguiente grupo. Por cada grupo de celdas en

paralelo que se unan en serie se multiplica a la tensión de las celdas (3.6 V), manteniéndose la capacidad total de las celdas que conformen el grupo paralelo.

A la hora de hacer las conexiones, se utilizan las abreviaturas 's' y 'p', para los términos serie y paralelo respectivamente. Por ejemplo, una batería para almacenamiento compuesta de 14 módulos en serie compuestos de 50 celdas conectadas en paralelo, suponiendo que la capacidad de las celdas fuese de 3.5 Ah obtendríamos una batería con tensión y capacidad de:

Tensión total = 14 celdas en serie * 3.6 V por celda = 50.4 V

Capacidad total = 50 celdas en paralelo * 3.5 Ah por celda = 175 Ah



Figura 5.2. Módulo de la batería.

Fuente: VICE

En el caso de las celdas, las capacidades y los precios de las baterías varían conforme a la forma de obtención y estado de estas (véase sección 8.2.).

5.1.2. Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

Un sistema de gestión de batería es un componente inteligente de una batería responsable de la supervisión y gestión avanzadas. Es el cerebro detrás de la batería y juega un papel crítico en sus niveles de seguridad, rendimiento, tasas de carga y longevidad.

Funciones del BMS en celdas Li-Ion:

En aras de la seguridad y de las celdas, un BMS de iones de litio debe, como mínimo (en orden de importancia), hacer lo siguiente:

- Evitar que el voltaje de cualquier celda exceda un límite, deteniendo la corriente de carga o solicitando que se detenga. Este es un problema de seguridad para todas las celdas de iones de litio.
- Evitar que la temperatura de cualquier celda exceda un límite deteniendo la corriente de la batería directamente, solicitando que se detenga o solicitando refrigeración.

Este es un problema de seguridad para las celdas de iones de litio que son propensas a la fuga térmica.

- Evitar que el voltaje de cualquier celda caiga por debajo de un límite deteniendo la corriente de carga o solicitando que se detenga.
- Evitar que la corriente de carga exceda un límite (que varía con el voltaje de la celda, la temperatura de la celda y el nivel anterior de corriente) al solicitar que la corriente se reduzca o se detenga, o al detener la corriente directamente.
- Evitar que la corriente de descarga exceda un límite, como se describe en el punto anterior.

Un BMS es esencial cuando se carga una batería de iones de litio. Tan pronto como cualquier celda alcance su voltaje de carga máxima, debe apagar el cargador. Un BMS también puede equilibrar la batería para maximizar su capacidad. Puede hacerlo eliminando la carga de la celda más cargada hasta que su voltaje sea lo suficientemente bajo como para que el cargador pueda volver a encenderse y cambiar las otras celdas para que se carguen. Después de muchos ciclos de este proceso, todas las celdas estarán al mismo voltaje, completamente cargadas, lo que significa que el paquete estará equilibrado. Un BMS también es esencial cuando se descarga una batería de iones de litio. Tan pronto como cualquier celda alcanza un voltaje de corte bajo, apaga la carga.

Los algoritmos y la electrónica avanzados garantizan mediciones de alta precisión:

- Funcionalmente seguro
- Balance rápido y eficiente
- Tiempo de carga reducido
- Alcance mejorado por carga
- Máxima vida de la batería

El propósito de un BMS por tanto es:

1. Proporcionar seguridad a la batería y longevidad, una herramienta imprescindible para el ion de litio.
2. Revelar el estado de la función en forma de estado de carga y estado de salud (capacidad)
3. Rápida precaución y servicio. Esto podría ser alta temperatura, desequilibrio de las celdas o calibración.
4. Indicar el final de la vida útil cuando la capacidad cae por debajo del umbral objetivo establecido por el usuario.

No todos los BMS ofrecen todas estas características. Las funciones más básicas son la protección de la batería y el estado de carga (SoC). Si bien el SoC es útil, la lectura est  incompleta sin seguir también la capacidad a medida que la batería se desvanece. El usuario puede estar acostumbrado a una batería que ofrece capacidad total, pero esta condición es temporal y no se puede mantener. La capacidad es el indicador principal del estado de salud de la batería (SoH) y debe formar parte del BMS.

La Figura 11 ilustra los componentes de la batería que consisten en energía almacenada, la porción vacía que se puede rellenar y la parte inactiva que se pierde permanentemente. La capacidad nominal se refiere a la capacidad especificada por el fabricante en Ah que solo es válida cuando la batería es nueva; la capacidad disponible designa la verdadera capacidad de almacenamiento de energía derivada de deducir la parte inactiva. El estado de carga (SoC) se refiere a la energía almacenada, que también incluye la parte inactiva.

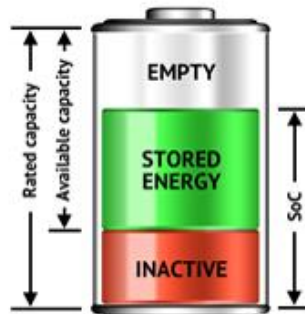


Figura 5.3. Tres partes de una batería.

Fuente: Battery University

Un BMS, por tanto, está programado a una capacidad nominal y mide los culombios de entrada y salida que se relacionan con la capacidad disponible. A medida que disminuye la capacidad, el recuento de culombios disminuye y esta discrepancia permite la estimación de la capacidad. Las lecturas más precisas son posibles al contar los culombios de una batería completamente descargada durante una carga completa o descargar una batería completamente cargada hasta el punto de corte. Tales arranques limpios rara vez son posibles y las estimaciones de capacidad de la vida real se confunden con el tiempo.



Figura 5.4. BMS Batrium Watchmon 4 Longmon.

Fuente: Batrium

El precio del BMS Watchmon 4 que incluye 14 elementos Longmon para monitorización del estado de las celdas en los módulos es de 680,21€ [16].

5.1.3. Estructura espaciadora y soportes para celdas (Holders)

La función primordial de estas estructuras es entregar un soporte para un conjunto de celdas. Las pestañas que tiene incorporadas permiten configurar el tamaño conforme el requerimiento del usuario. Cada estructura se compone de 20 poros (4 filas y 5 columnas).

El material del cual está compuesto es plástico ABS y policarbonato, siendo un soporte de gran resistencia y fácil disipación del calor.

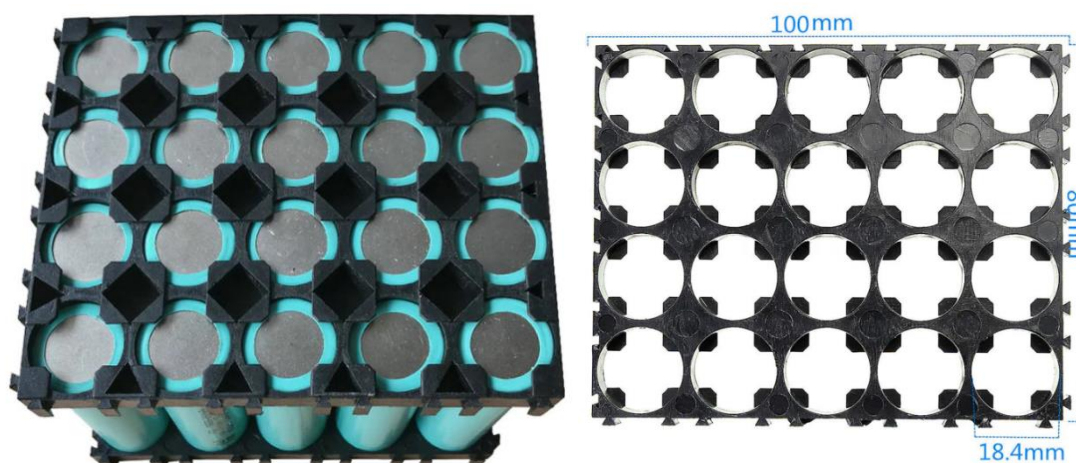


Figura 5.5. Estructura y soporte de celdas.

El tamaño de cada soporte individual es de 100x80 mm y cada poro en el que va insertado la celda es de 18.4 mm.

El precio para un conjunto de 10 soportes es de 7,07 € [17].

5.1.4. Embarrado/Barras de cobre (Busbar)

El embarrado o barras de cobre son conductores de corriente en forma de barra gruesa rectangular. Para nuestra batería el uso de cable compuesto de múltiples alambres delgados de cobre trenzado de 35 mm², en ambas terminales de los módulos, recomendado por Victron Energy será utilizado teniendo en cuenta una longitud inferior a 5 metros [18], [19].

Como se explica a continuación, la longitud del cable va relacionada con el dimensionado de la batería (véase apartado 8.1.), siendo escogida y calculada la longitud del cable de la batería de 3 m del primer caso (opción B), lo mismo sería aplicable para la longitud de 4.76 m del primer caso. Un aspecto que considerar es la resistencia que ejercerá el cable dispuesto en la batería.

Estas longitudes están calculadas en función del ancho y alto de la batería suponiendo que el cable está en forma de “U” en ambas terminales.

Segundo caso (opción B):

Longitud cableado = $0.44 \times 2 + 0.32 + 0.15 \times 2 = 1.5 \times 2$ (terminal positivo y negativo) = 3 m

3 x 14 módulos = 42 m

Nota: los 0.15 metros es el cable sobrante para establecer y colocar las terminales del cable de los polos positivo y negativo.

Resistencia = $\rho \times \text{longitud} / \text{área}$

$R = \rho \times l / A$

Resistencia de un cable de 3 m de longitud y 35 mm^2 de sección correspondiente a un módulo:

$\rho \text{ cobre} = 1.7 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$

$l = 3 \text{ m}$

$A = 35 \text{ mm}^2 = 35 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

$R = \rho \times l / A;$

$R = 1.7 \times 10^{-8} \times 3 / (35 \times 10^{-6}); R = 1.7 \times 10^{-2} \times 3 / 35;$

$R = 1.457 \times 10^{-3} \Omega = 1.457 \text{ m}\Omega$

- Efecto de la longitud del cable:

Partiendo de la formula podemos afirmar que a medida que el cable sea más largo, la resistencia aumenta, por lo tanto, para los 14 módulos la resistencia total será 20,398 mΩ.

- Efecto del grosor del cable:

De la misma manera si el cable es más fino, de menor sección, la resistencia aumenta. Una alternativa a considerar sería incluir un cable de mayor sección para tener menor resistencia, pero debido al diseño y al espacio disponible en la estructura espaciadora de celdas, esto no se contempla. Concluyendo, por lo tanto, que el grosor como la longitud influyen en la resistencia del cable.



Figura 5.6. Cable de 35 mm².

El precio para el cable de 35mm² de 42 m es de 339,36 € [20].

5.1.5. Fusibles de cristal

El fusible de vidrio rápido axial será de 3x10mm 5A con conductor de plomo. Este componente es utilizado como conductor al soldarlo, con un soldador de estaño, desde las terminales de las diferentes celdas a la barra de cobre o “busbar”.



Figura 5.7. Fusibles de vidrio.

El precio de estos fusibles para un lote de 1000 unidades es de 7,28 € [21].

Se necesitarán tres lotes suponiendo un total de 21,84 €.

5.1.6. Tira de níquel

La tira de níquel y acero de 3m de longitud y dimensiones de 8 x 0,1 mm es utilizado para unir baterías 18650 y soldar sobre ellas los fusibles de cristal, evitando el contacto directo del soldador con la batería.



Figura 5.8. Tira de níquel.

El precio de este componente es de 7,99 € [22].

5.2. COMPONENTES AUXILIARES

5.2.1. Evaluador/Cargador de baterías

Sirve para medir la capacidad real de las baterías, se opta por un cargador marca OPUS BT-C3100, además de seguir una curva de carga tipo CC/CV tendremos la posibilidad de comprobar la capacidad real de nuestras celdas de litio, regenerarlas, cargarlas, descargarlas y comprobar su resistencia interna para ver si deberían desecharse o todavía disponen de más ciclos de uso.

Dispone de 4 ranuras de carga independientes para baterías recargables de diferentes tipos y tamaños y con diferentes capacidades para comprobarlas al mismo tiempo. Además, incluye detección de sobrecalentamiento para proteger las baterías o celdas recargables y el cargador de un posible sobrecalentamiento.

La corriente de carga se puede seleccionar para que sea 200mA, 300mA, 500mA, 700mA o 1000mA (1500mA y 2000mA se pueden aplicar cuando solo se selecciona la ranura 1 o 4), siendo la corriente de descarga predeterminada de 500 mA, también modificable.



Figura 5.9. Evaluador/Cargador de baterías.

El precio de este dispositivo es de 28,96 € [23].

5.2.2. Cámara térmica

Cámara de imagen térmica infrarroja FLIR ONE de 80 x 60 IR de resolución térmica para smartphone. Su función visual y de medición de temperatura ayuda a determinar las celdas en las cuales se generan puntos críticos de calor debido a un funcionamiento inusual para su control y mantenimiento.



Figura 5.10. Cámara de imagen térmica infrarroja.

El precio de la cámara térmica es de 240,79   [24].

5.2.3. Máquina de soldar por puntos

El soldador por puntos SUNKKO 709AD +, de potencia instantánea 3.2 kW y de pulso automático permite soldar la tira de níquel a los terminales de las celdas 18650 del paquete de baterías.



Figura 5.11. Máquina de soldar por puntos.

El precio de la máquina para soldar es de 155,44 € [25].

5.2.4. Soldador de estaño

Soldador de estaño de 100 w indicado para realizar soldadura blanda, con un rango de temperatura: de 500 – 550 °C para una rápida soldadura en los terminales de las celdas, uniendo los fusibles de cristal al níquel.



Figura 5.12. Soldador de estaño.

El precio del soldador de estaño es de 14,99 € [26].

5.2.5. Conectores Anderson

Conectores Anderson de 175 A para cableado de 35 mm² para establecer las conexiones en serie entre módulos de la marca ELEHAN.

Permiten un uso correcto para una corriente nominal 175^a y una temperatura de funcionamiento desde -20 °C a 105 °C.

Los contactos están compuestos de cobre plateado.



Figura 5.13. Conector de 175 A para cable de 35 mm².

El precio del lote de 5 conectores con sus correspondientes terminales con acabado estañado de alta resistencia es de 53,99 € [27].

Serán necesarios tres lotes.

5.2.6. Interruptor aislador de la batería

Interruptor aislador de batería para sistemas de 12V/24V/48V y 300A. Su función es desconectar la batería de forma segura, para eliminar el consumo de energía de la batería cuando el conjunto no está en uso. Se compone de dos posiciones: posiciones de encendido y apagado. La parte interna está fabricada de cobre, con buena conductividad eléctrica. La parte exterior está fabricada de plástico ABS, suponiendo un fuerte aislamiento, resistencia y duradero.



Figura 5.14. Interruptor aislador de batería.

El precio del interruptor es de 16,99 € [28].

5.2.7. Multímetro digital

El multímetro permite medir directamente magnitudes eléctricas activas como intensidades y diferencias de tensión o magnitudes pasivas como resistencia o capacidad.



Figura 5.15. Multímetro digital automático.

El precio del multímetro digital automático LOMVUM T28B es 25,99 € [29].

5.2.8. Tubo PVC termo retráctil

El tubo de PVC termo retráctil es utilizado para el recubrimiento de las celdas 18650 en caso de que se encuentre su recubrimiento exterior deteriorado.



Figura 5.16. Tubo de PVC termo retráctil.

El tubo de PVC termo retráctil de Sourcingmap de 2 m de longitud tiene un precio de 10,60 € [30].

5.3. CONEXIÓN DE LA BATERÍA

La conexión del conjunto de nuestra batería, como ya se ha explicado anteriormente, ha de realizarse siguiendo las medidas de seguridad indicadas.

Los pasos para proceder a realizar la conexión del conjunto se detallan en los siguientes puntos:

1. Para comenzar es necesario disponer todas las celdas con una capacidad similar, en nuestro ejemplo, en torno a los 2 Ah. Bien es cierto que en un módulo todas las celdas que lo conformen no van a tener idéntica capacidad, para ello existe una herramienta o software libre llamada “rePackr”, que calcula la disposición de las celdas dentro de los módulos, previamente introduciendo todos los valores reales de las capacidades de las mismas, para distribuir estas de tal manera que el módulo quede equilibrado de la manera más homogénea posible.
2. Una vez obtenida la distribución idónea de las celdas en los 14 módulos, se procederá a su montaje en los soportes correspondientes, dejando los dos espacios centrales liberados (véase Figura). Cada módulo dispondrá de 176 celdas conectadas en paralelo para aumentar su capacidad y cada módulo estará conformado por 40 soportes, 20 en la parte inferior y otros 20 en la superior permitiendo una estructura estable.

3. Para realizar la conexión en paralelo es necesario, con vistas a proteger cada celda individualmente, soldar en las terminales una pequeña cantidad de tira de níquel. La parte fundamental que ha de disponerse en las dos terminales de cada módulo son los "busbar" o cableado de cobre de 35 mm², como ya se ha explicado anteriormente estos tendrán forma de "U" e irán dispuestos en la parte superior de los soportes en el espacio disponible entre las celdas. Un detalle importante es disponer la conexión positiva saliendo por un extremo y la negativa por el extremo contrario, así el recorrido de la corriente que pasa por cada celda tiene la misma longitud. Un ejemplo similar es utilizado en sistemas de calefacción, llamado "retorno invertido", y equilibra la carga de cada radiador, en este caso hará lo mismo en cada módulo de la batería evitando un recalentamiento dispar en distintas zonas.
4. Una vez realizado esto, se procederá a unir mediante soldadura los fusibles de cristal uno a uno entre cada celda y el cableado de cobre, procediendo de esta manera a realizar la conexión en paralelo en ambos terminales de cada módulo.

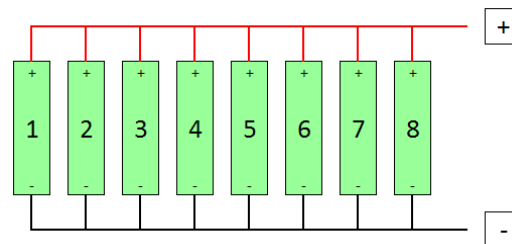


Figura 5.17. Esquema simplificado de la conexión en paralelo de las celdas en el módulo.

Fuente: Endless Sphere

5. Después se procederá a conectar los 14 módulos en serie para obtener el voltaje de la batería requerido, para ello previamente habrá que utilizar e instalar en los extremos del cableado de cobre los conectores Anderson con sus correspondientes terminales. El esquema de conexión es similar al mostrado en la Figura , a excepción de añadir 14 módulos en serie:

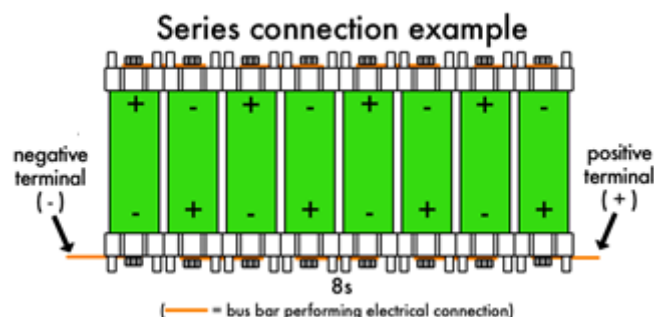


Figura 5.18. Esquema de conexión de los módulos en serie simplificado.

Fuente: Vruzend

6. Por último, y para una mejor gestión de los módulos, será necesario la conexión del BMS a la batería estableciendo las correctas conexiones a cada módulo, en sus

terminales, y a las conexiones de carga y de descarga de la instalación. Todo ello se realizará por soldadura de forma similar a la conexión mostrada en la Figura , a excepción de considerar 14 módulos en serie. Para acabar también se procederá a conectar el interruptor aislador de la batería a la instalación para su apagado o encendido en el caso que se requiera.

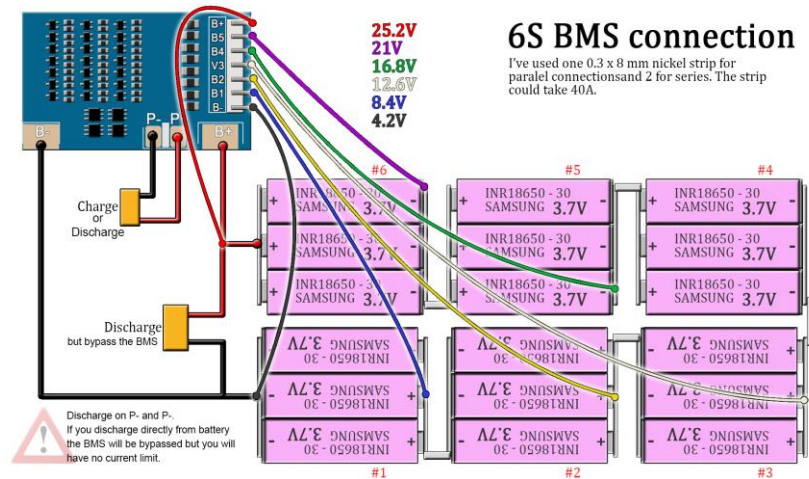


Figura 5.19. Conexión del BMS a los módulos de la batería.

Fuente: Electronoobs

6. CÁLCULOS EN LA VIVIENDA

Para poder analizar y calcular la configuración del conjunto de la batería es necesario definir primero ciertos aspectos de vital relevancia como son los perfiles de consumo o las curvas de demanda aplicables en España.

La siguiente Figura 14 representa el consumo total que se produce en los sectores de industria, servicios y residencial suponiendo el 45, 30 y 25% respectivamente [31].

La energía demandada por la sociedad depende del momento del día: las horas de mayor demanda y consumo se denominan horas punta y los momentos de menor demanda, las horas valle.

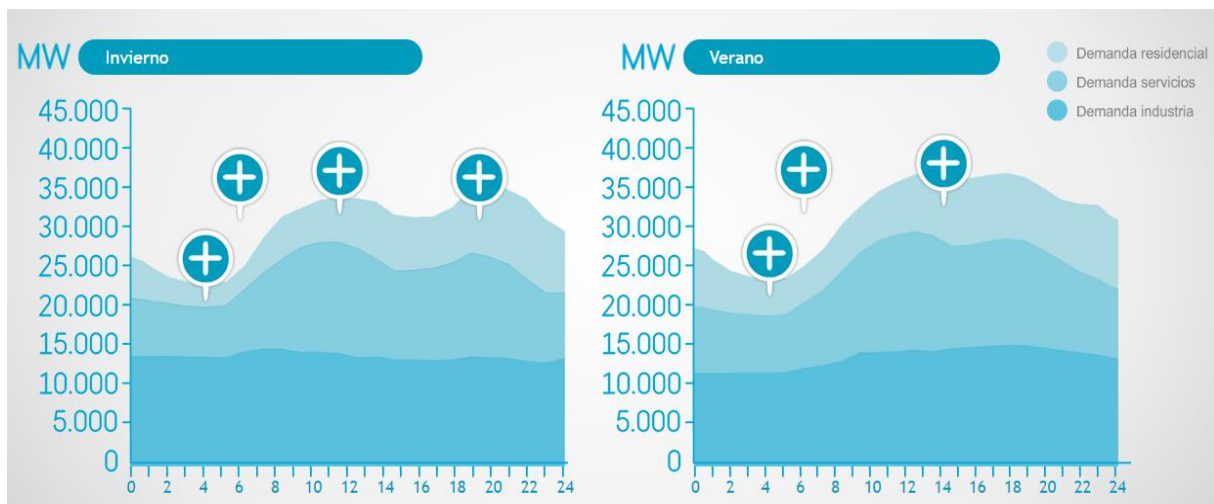


Figura 6.1. Consumo total en un día de los sectores de industria, servicios y residencias.

Fuente: REE

El comienzo del ascenso de la demanda eléctrica se inicia a las 6:00h coincidiendo con el inicio de la jornada laboral. Entre las 11:00 h. y las 12:00 h se produce una hora punta debido a la gran actividad de las empresas de servicios y al comienzo de uso de electrodomésticos en las cocinas de los hogares.

Sobre las 19:00 h. y 20:00 h. de la tarde debido a la gran actividad comercial y la vuelta casa de muchas personas se produce la punta máxima del día.

En concreto para el consumo del hogar la cantidad de electricidad varía acorde a lo comentado a lo largo del día y de igual manera de forma distinta en verano y en invierno.

El inicio de la jornada en los hogares en torno a las 8:00 h. supone el pico máximo de la mañana.

En invierno la demanda máxima de los hogares se produce entre las 21:00 h. y las 22:00 h., coincide con que en las residencias u hogares hay una elevada actividad de personas que producen un gran uso de calefacción, televisión e iluminación además de otros electrodomésticos.

En verano, a parte del máximo producido por la tarde, sobre las 14:00 y las 16:00 h. se produce otro pico máximo de consumo por el uso del lavavajillas, televisores y equipos de aire acondicionado [31].

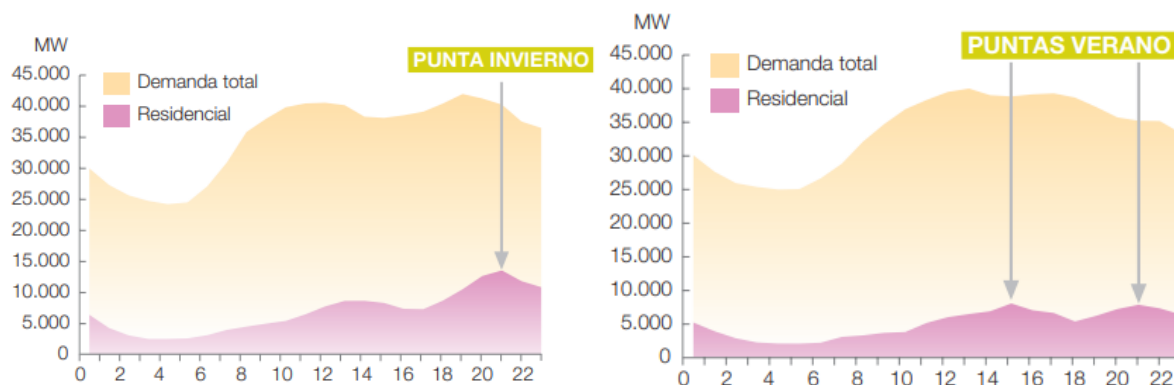


Figura 6.2. Perfil de consumo en invierno y verano.

Fuente: REE

Los mayores consumidores de electricidad en los hogares, como se puede apreciar en la Figura 35, son la iluminación, el frigorífico, la calefacción y el televisor.

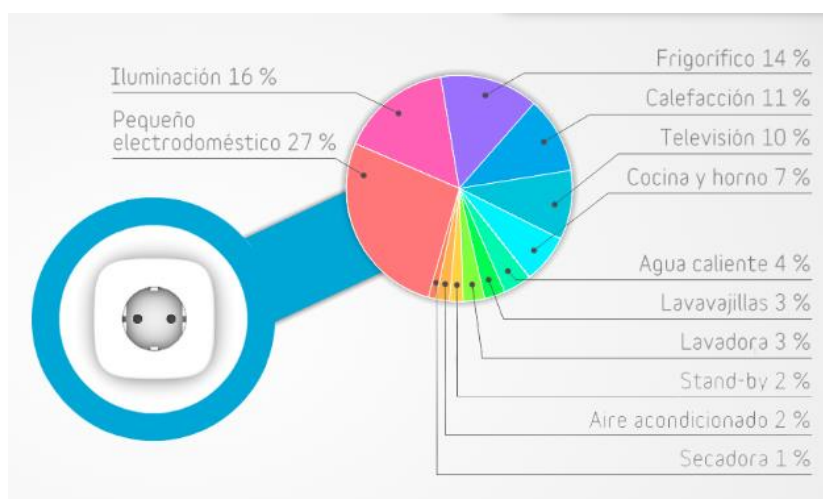


Figura 6.3. Distribución del consumo anual de un hogar medio.

Fuente: REE

Consumir electricidad de forma responsable es más económico, bien porque se reduce el consumo, o bien porque se desplaza a horas de menor precio. Además, ayuda a reducir el impacto ambiental y luchar contra el cambio climático. Conocer los hábitos, frecuencia y horas de uso de los electrodomésticos es útil para gestionar de la manera más eficiente y correcta nuestra batería.

6.1. CARACTERÍSTICAS Y ENERGÍA ESTIMADA

El consumo medio anual en un hogar español es de 3272 kWh lo que supone 9 kWh diarios, unos 270 kWh mensuales, traducidos económicamente a 500 € y 1,35 € anuales y diarios respectivamente. Cabe indicar que la potencia contratada media en España es de 4 KW [31].

Partiendo del consumo eléctrico medio anual de una vivienda familiar, que ponemos como ejemplo, podemos apreciar que en este caso está en torno a los 240 kWh mensuales teniendo una potencia contratada de 4.4 kW.

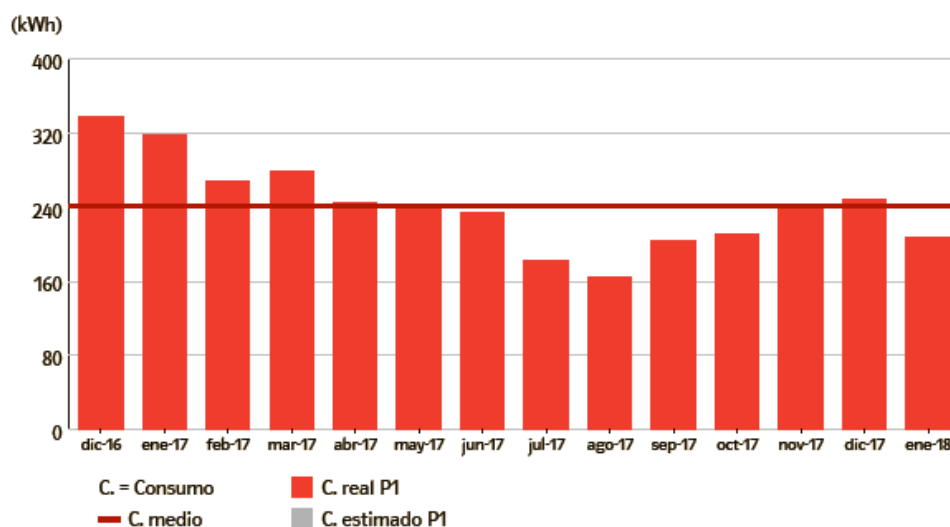


Figura 6.4. Consumo eléctrico medio anual de una vivienda familiar.

Fuente: Viesgo

Una parte importante para poder dimensionar bien nuestra instalación es seleccionar de manera correcta la tensión de la batería para que así la vida útil de esta se alargue lo máximo posible.

El cálculo de la tensión correcta de las baterías debe realizarse en función del consumo energético de la vivienda, es decir, los Wh que consume al día, y así hacer una prueba para comprobar cuál será la tensión de baterías correcta para nuestra instalación.

Por ejemplo, teniendo unos consumos de unos 9000 Wh/día, vamos probando con las diferentes tensiones posibles, siendo estos sistemas de 12, 24, 48 y 52 voltios.

6.1.1. Primer caso: Dos días de autonomía sin recarga

Los 9000 Wh/día estimados se dividen entre la tensión que se requiere y a continuación se debe multiplicar el resultado por 2 para que la batería no se descargue a más de la mitad (50% de profundidad de descarga). El resultado obtenido se debe multiplicar de nuevo por 2 para obtener el valor correspondiente a 2 días de autonomía.

Para un sistema de 12 voltios: $9000/12 = 750 \times 2 = 1500 \times 2 = 3000 \text{ Ah}$

Visto esto nos damos cuenta de que nos sale una capacidad de baterías muy elevada.

Para un sistema de 24 voltios: $9000/24 = 375 \times 2 = 750 \times 2 = 1500 \text{ Ah}$

Esta capacidad para una instalación de estas características apreciamos que sigue siendo elevada.

Para un sistema de 48 voltios: $9000/48 = 187.5 \times 2 = 375 \times 2 = 750 \text{ Ah}$

En esta última opción vemos que se reduce la capacidad de las baterías, siendo este sistema más adecuado para nuestra instalación, aunque todavía es un poco elevado.

Para un sistema de 52 voltios: **$9000/52 = 173.07 \times 2 = 346.15 \times 2 = 692.30 \text{ Ah}$**

Como se ha expuesto anteriormente, para la batería del hogar se usarán celdas 18650 para la construcción de módulos y “packs”.

El inversor a utilizar será uno de 48 V para el uso de energía, lo que supone que será necesaria una batería de Li-ion 13s o 14s. La mejor opción es una 14s, es decir, 14 celdas en serie que suponen una tensión nominal de 51.8 V.

Tensión nominal: $14 \times 3.7 \text{ V}^2 = 51.8 \text{ V}$

Esto supone un rango de tensiones de 42 V- 58.8 V, ya que el corte de baja tensión es en torno a 42 V, siendo más adecuado a los inversores que más comúnmente se comercializan de 48 V.

Como hemos especificado anteriormente, hay que diseñar la batería conforme a la cantidad de energía necesaria en el uso diario de la vivienda.

Por tanto, debemos buscar una batería con un voltaje de 52V y un amperaje de 692.30 Ah.

Redondeando en términos de capacidad hasta 704 Ah y suponiendo que las celdas 18650 son de 2 Ah aproximadamente, correctamente testeadas, comprobadas y puestas a punto para la construcción de la batería (para ello las celdas han de tener aproximadamente la misma capacidad, es decir, puede ocurrir que a la hora de medirlas algunas celdas tengan 2,05 Ah y otras 2,11 Ah. Lo ideal sería que todas fuesen iguales, pero en la práctica la situación es diferente, se requieren 352 celdas por grupo de paralelo para alcanzar el objetivo de 700 Ah, suponiendo que sean celdas reutilizadas.

El objetivo primordial es conseguir que los grupos de 352 celdas tengan la misma capacidad posible para después construir los módulos paralelos de 352 celdas (352p), soldadas por puntos conjuntamente, usando conectores en bloque.

Una vez obtenidos los grupos en paralelo montados, se conexionarán en serie conectando las barras colectoras con el siguiente grupo en paralelo hasta que se realice la construcción 14s352p de la batería.

Por último, se añade un conector de equilibrio con un cableado de equilibrio que se conecte a la terminal positiva de los 14 grupos paralelos. Para que las celdas trabajen de la manera más correcta y duradera, será necesario el uso de un cargador de equilibrio (balance charger).

² Dependiendo del fabricante la tensión nominal por celda puede ser indicada como 3.6 o 3.7 V, suponiendo ligeras variaciones en los cálculos.

Esta conexión supondrá un total de 4928 celdas.

Para el uso ideal de esta batería la tasa de carga C será baja, es decir, el límite superior será de 0.5 C. Esto supone que cada celda no entregará más de 1 A, traduciéndose en un correcto uso de estas. A 52 V, una capacidad máxima de 352 Ah supondría 18304 Wh de energía total, siendo ligeramente menor la energía total utilizable.

6.1.2. Segundo caso: Un día de autonomía con recarga

Siguiendo el mismo método de cálculo que para el caso anterior obtenemos que para un día de autonomía obtenemos los siguientes resultados:

Para un sistema de 52 voltios: $9000/52 = 173.07 \times 2 = \mathbf{346.15 \text{ Ah}}$

Redondeando en términos de capacidad hasta 352 Ah y suponiendo que las celdas 18650 son de aproximadamente **2 Ah** se requirieron 176 celdas por grupo de paralelo para alcanzar el objetivo de 352 Ah, suponiendo que sean celdas reutilizadas.

Por lo tanto, la configuración será **14s176p**, componiéndose la batería de un total de 2464 celdas.

Para el uso ideal de esta batería la tasa de carga C será de 0.5 C. Esto supone que cada celda no entregará más de 1 A, traduciéndose en un correcto uso de estas. A **52 V**, una capacidad máxima de **176 Ah** supondría **9152 Wh** de energía total, siendo ligeramente menor la energía total utilizable.

En consecuencia, estos Wh resultantes nos permitirían no depender de la red eléctrica durante un día. Estableciendo y suponiendo una situación más acorde a la realidad en la cual los fallos de suministro de energía eléctrica son poco comunes en España por lo general, podemos considerar la recarga del conjunto de la batería en periodos donde la demanda y el precio de la luz sea más bajo y aprovechar esa energía almacenada para los periodos en los que hay más actividad en los hogares y en los cuales la electricidad es más cara.

6.2. CONEXIÓN EN EL HOGAR

El almacenamiento de energía en el hogar mediante una batería puede ser realizado mediante la instalación de paneles solares, turbinas eólicas o cualquier sistema de generación de energía. De esta manera se consigue acumular la energía que no es aprovechada durante el pico de producción eléctrica (pico solar, eólico, etc.), la cual será utilizada en las viviendas en el momento de pico máximo de consumo.

Este almacenamiento permite poder acceder a esta energía cuando sea necesario o bien venderla de nuevo a la red durante el pico de demanda de energía. También incluso se puede “comprar” esta electricidad de la red por la noche cuando es barata y aprovechar su uso durante el día cuando el precio de la electricidad de la red es más elevado.

De esta forma conseguimos, en algunos casos, una independencia total de las compañías eléctricas. En otros casos no se consigue la independencia total, pero sí una reducción de la factura eléctrica muy importante.

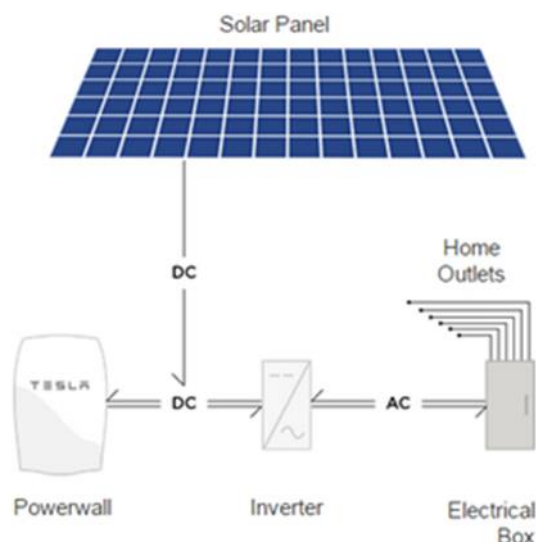


Figura 6.5. Esquema de la instalación.

Fuente: Tesla

En el caso de una instalación solar doméstica, estas constan de un panel solar, un inversor eléctrico, regulador de carga y una batería para almacenar energía solar sobrante que se podrá usar posteriormente, además de elementos auxiliares de conexión. Este esquema simple de elementos necesarios puede variar dependiendo del acoplamiento que se elija para la vivienda.

A continuación, se describen de forma breve los elementos más importantes que se pueden dar en este tipo de instalaciones:

- Regulador de carga

Este controla y orienta la cantidad de energía que fluye entre los paneles fotovoltaicos y la batería. Existen dos tipos de reguladores: el PWM y el MPPT.

Con el PWM, los paneles funcionan y trabajan a la misma tensión a la que la batería se encuentre cargada, por lo que su consecuencia genera pérdidas de rendimiento energético, ya que en cuanto la batería llega a la tensión señalada, el regulador interrumpe el contacto entre los paneles y batería, evitando así una sobrecarga (fase de absorción).

El MPPT se compone de un controlador del punto de máxima potencia (Maximum Power Point Tracking) y un transformador CC-CC, encargado de convertir la CC de alta tensión en CC de más baja tensión. Este regulador, junto con los paneles, trabaja a la tensión más adecuada en el momento para extraer de esta forma la máxima potencia o limitarla en fases de absorción o flotación (el regulador es el encargado de mantener la batería cargada y evitar sobrecargas y descargas).

El uso de un tipo u otro depende mayormente de la utilización y potencia necesaria, por lo que, para una vivienda, al tratarse de una instalación grande, la utilización de un regulador MPPT es más recomendable ya que además consigue un mejor mantenimiento de la batería.

- Inversor de conexión a red

Este tipo de inversores son los encargados de transformar la energía proveniente de los paneles solares en electricidad a 230 V para el consumo en la vivienda o para verterlo a la red eléctrica. Con este tipo de inversores es necesario estar conectado a la red eléctrica, por lo que para viviendas aisladas este inversor no es empleado.

Otra consideración a tener en cuenta es que con este tipo de inversor es necesario incluir un inversor cargador de baterías para poder acumular la energía.

- Inversor/cargador de baterías

El inversor/cargador es clave en la instalación ya que es el encargado de detectar la tensión de la batería en cada momento, por lo que si esta baja hasta el mínimo, se activa la función cargador, dando la orden a grupos electrógenos, en el caso de que se dispongan, o permitiendo a la red eléctrica la recarga de la batería.

Una característica de este inversor es la rapidez (20 ms) con la cual es capaz de proporcionar corriente en el caso de una interrupción en el suministro, impidiendo que se desconecte cualquier dispositivo electrónico.

Estos inversores proporcionan una corriente alterna de tipo senoidal, asemejándose a la proporcionada por la red eléctrica.

- Inversor híbrido

Los inversores híbridos son capaces de aprovechar y gestionar a la vez diferentes fuentes de energía, pudiendo además almacenar esta energía en una batería. Este tipo de inversores es más adecuado en lugares donde la red eléctrica es de baja calidad o directamente no se tiene acceso a ella.

El propósito de este tipo de inversor es gestionar y aprovechar al máximo los diferentes recursos evitando que el excedente generado sea el menor posible y almacenarlo en las baterías sin verter este excedente a la red.

6.2.1. Acoplamiento CC y CA

Para hogares o viviendas con el objetivo de autoconsumo existen dos maneras de establecer la conexión e instalación en base al acoplamiento, ya sea mediante un inversor de red (acoplamiento CA) o un regulador MPPT (acoplamiento CC). Cabe resaltar que a la hora de dimensionar una instalación hay diversos factores, a parte del acoplamiento, que desempeñan un papel fundamental, como puede ser la orientación de los paneles, potencia a instalar, etc. En este caso se plantean las diferencias entre las diferentes posibilidades de acoplamiento [32].

- **Acoplamiento en CC**

En esta configuración los paneles fotovoltaicos son conectados a un regulador de carga MPPT. Este dispositivo es el encargado de recoger el punto de máxima potencia en función de la temperatura e irradiación disponible para un momento determinado.

Una característica reseñable de este acoplamiento es la posibilidad de carga de la batería y vertido de excedente a esta en CC de manera directa sin producirse ninguna transformación, aumentando de esta manera su eficiencia.

Este tipo de acoplamiento es preferible para instalaciones pequeñas, o cuando el mayor consumo se va a producir por la noche, ya que se almacena la energía en CC durante el día para transformarla en CA durante la noche a través del inversor/cargador.

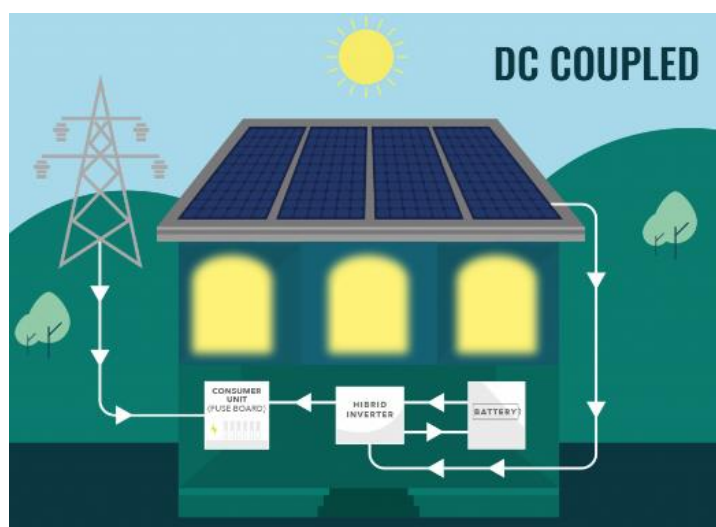


Figura 6.6. Acoplamiento CC.

Fuente: Naked Solar

- **Acoplamiento en CA**

En esta configuración se dispone de un inversor de red y un inversor/cargador. Los paneles fotovoltaicos se conectan a un inversor de red y el inversor/cargador es el encargado de generar el voltaje en CA necesario para que el inversor de red se sincronice y produzca energía a través de los paneles.

La energía generada en CA es utilizada para el consumo de las cargas del hogar sin experimentar ningún tipo de transformación. Por ello, este tipo de configuración es ideal cuando la demanda tiene lugar principalmente durante el día.

Una de las principales desventajas de esta configuración es la obligación de tener que transformar la corriente de CA a CC para cargar la batería, lo cual implica una pérdida de eficiencia pequeña. Por otro lado, el precio de un inversor de red es ligeramente mayor que el de un regulador en potencias hasta los 10 kW.

Además, es necesario resaltar la mayor complejidad a la hora de realizar esta configuración, ya que el cargador y el inversor han de ser configurados para que realicen la modulación por frecuencia cuando la batería alcance su máximo almacenamiento.

Este proceso se denomina "Frequency Shift" y produciendo que el inversor/cargador eleve la frecuencia de la red generada en CA al detectar que la carga de la batería está próxima a finalizar. Este aumento de la frecuencia del sistema es interpretado por el inversor de red

como una potencia excesiva y comienza a reducir la corriente inyectada. Los rangos de modulación suelen encontrarse entre 50.2-53 Hz.

Esto permite que la batería no reciba un amperaje de carga elevado y la vida útil de esta no se vea afectada y se prolongue.

Por último, la necesidad de un generador en caso de fallo de suministro para evitar el hipotético caso de la descarga completa de la batería es un factor que considerar.

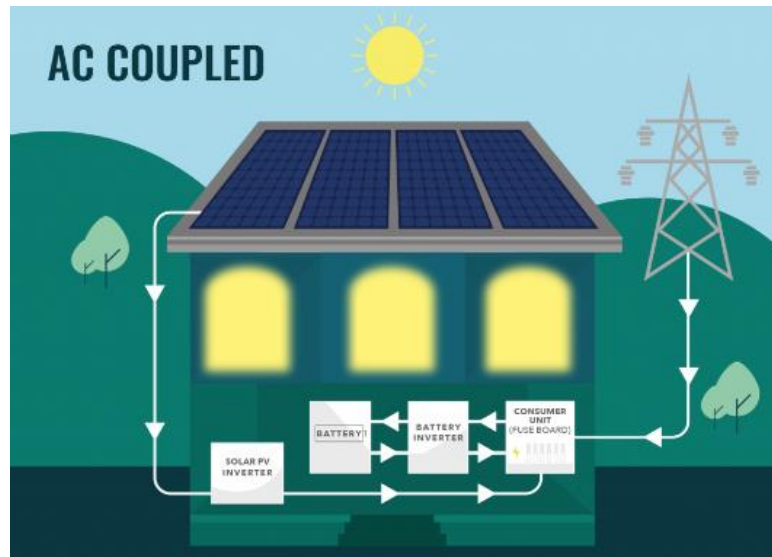


Figura 6.7. Acoplamiento CA.

Fuente: Naked Solar

- **Acoplamiento CA + Acoplamiento CC**

Una tercera configuración es establecer un sistema conjunto con los dos tipos de acoplamiento de CA y CC, esto permite gestionar los paneles de dos maneras distintas, mediante regulador o mediante inversor de red.

Esta configuración permite prescindir del grupo electrógeno en caso de descarga profunda, siendo el regulador el encargado de cargar la batería en CC cuando las condiciones lo permitan. Por ello, esta configuración es utilizada en instalaciones sin conexión a red.

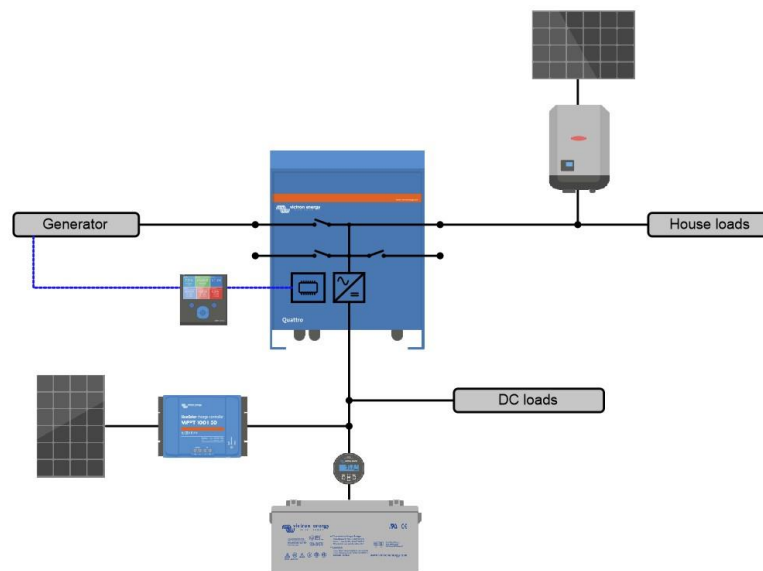


Figura 6.8. Acoplamiento CC + Acoplamiento CA.

Fuente: Victron Energy

Resumiendo, estos son los principales aspectos a tener en cuenta para los acoplamientos descritos:

- Para el acoplamiento CA es conveniente que la potencia del inversor/cargador sea igual o mayor que la potencia del inversor de red. Además, para este tipo de acoplamiento es necesario el uso de un generador de emergencia debido a que existe la posibilidad de que la batería se descargue por completo. Además, requiere inversores separados para su batería y paneles, lo que se traduce en pérdida de eficiencia en la transferencia de entrono a 1-3% [33].
- Para el acoplamiento CC el regulador de carga, para saber cómo trabaja la batería, tiene que recibir el voltaje primero, ya que recibir voltaje de las placas primero puede dar lugar a que el sistema sufra daños. Además, hay que tener en cuenta el voltaje máximo que el regulador permite a la entrada de las placas solares para evitar sobrepasar este valor y así prevenir daños en el sistema. En este tipo de acoplamiento la batería y los paneles comparten el mismo inversor híbrido y la transferencia de energía es más eficiente que en el acoplamiento de CA.

Para concluir y viendo la validez de las diferentes alternativas, la solución a incorporar dependerá de la vivienda, su situación, características y requerimientos en función del consumo, por lo tanto, habría que realizar un estudio más detallado en función de cada caso.

6.2.2. Sistema de almacenamiento

Para maximizar el autoconsumo es necesario el uso de sistemas de almacenamiento junto con sistemas de gestión de energía. Los inversores desempeñan un papel fundamental en este aspecto permitiendo un sistema de control y unos flujos de energía complejos garantizando las siguientes funciones:

- Programación de carga en tarifas o periodos valle.
- Mejora de la calidad de la red.
- Desconexión en caso de emergencia.

Flujo de energía en sistemas de almacenamiento

En general, un sistema de almacenamiento con paneles fotovoltaicos puede trabajar con los siguientes flujos de carga:

1. Generador (paneles fotovoltaicos) → Inversor de red/FV: energía fotovoltaica CC.
2. Inversor de red/FV → Consumo hogar CA
3. Inversor de red/FV → Inyección del excedente a la red CA.
4. Inversor/cargador → Batería: carga de la batería CC.
5. Batería → Inversor/cargador: descarga de la batería CC.
6. Red CA → Inversor/cargador: carga de la batería con energía de la red CC.

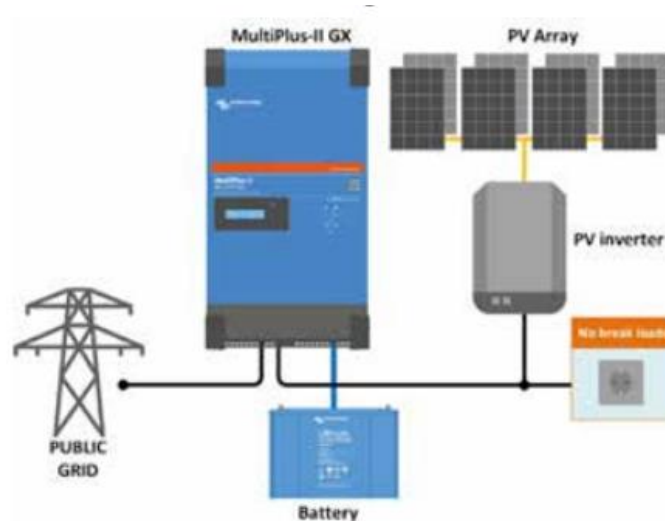


Figura 6.9. Flujos de energía en sistema de almacenamiento.

Fuente: Victron Energy

La opción más común en el mercado hoy en día es el uso de un inversor de red y un inversor/cargador, como se puede observar en la figura 41, la energía de los paneles fotovoltaicos se convierte a través del inversor de red directamente en CA y es utilizada para los consumos de la vivienda. El inversor/cargador es por tanto el encargado de utilizar la energía fotovoltaica excedente para cargar la batería o para devolver la energía a la red en el caso de que la batería este completamente cargada. Además, este último se encarga de descargar la batería para los consumos o utilizar la energía de la red para complementar la falta de energía fotovoltaica.

En caso de emergencia o fallo de suministro eléctrico, el inversor/cargador se desconecta de la red, pero continuará alimentando las cargas de la vivienda.

6.2.3. Tecnología Multi-Flow

Los flujos de energía descritos son importantes para asegurar un buen funcionamiento de todo el sistema de almacenamiento mediante placas fotovoltaicas. El control del flujo de energía en todo el sistema es determinante para una correcta gestión, y esta es realizada mediante los inversores, aunque bien es cierto que estos flujos llegan a perder eficiencia al no poder realizar estos flujos simultáneamente.

Existe una tecnología capaz de realizar un control inteligente de la instalación de paneles fotovoltaicos y todo el sistema de almacenamiento de energía a través de un inversor llamada Multi Flow, permitiendo un control de flujo simultáneo.

Algunos ejemplos de esta tecnología y sus usos son los siguientes [34].

1. Suministro simultáneo del sistema fotovoltaico y la batería al hogar

En este caso el sistema de placas fotovoltaicas es encargado de suministrar la energía necesaria para el consumo generado en la vivienda, siendo la batería la responsable de cubrir los consumos necesarios que la instalación de paneles no logre abastecer.

En el caso de no disponer de esta tecnología Multi Flow, los flujos de energía no sucederían en paralelo, por lo que la parte que los paneles fotovoltaicos no logren abastecer, la batería pese a estar cargada y disponible no sería capaz de cubrir las necesidades. Por lo tanto, el uso de energía de la red sería necesaria o bien tener que apagar la instalación fotovoltaica para aprovechar la energía almacenada de la batería.

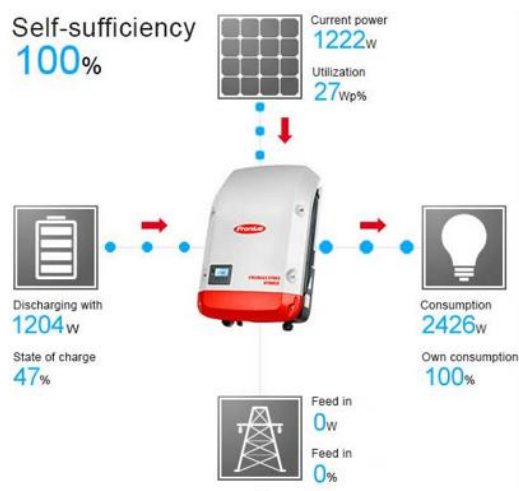


Figura 6.10. Suministro simultaneo de la instalación fotovoltaica y la batería.

Fuente: Fronius

2. Carga de la batería y suministro de energía a la vivienda con paneles fotovoltaicos

En esta situación, la potencia obtenida de los paneles fotovoltaicos supera la necesaria para abastecer los consumos de la vivienda, esta energía excedente generada es utilizada por lo tanto para cargar la batería y almacenarla. Una vez la carga de la batería está completa, el excedente es vertido a la red. Sin esta tecnología el excedente generado por los paneles sería automáticamente vertido a la red.

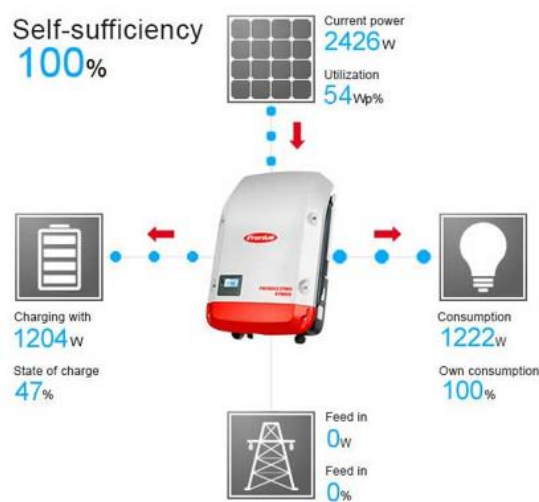


Figura 6.11. Carga de la batería y suministro de energía en la vivienda.

Fuente: Fronius

3. Carga de la batería y suministro de energía a la vivienda simultánea con energía solar y otros generadores de energía

En este caso, como en el caso 2, gracias a esta tecnología se puede cumplir las dos funciones de suministro a la vivienda y almacenamiento de energía. Además, existe la posibilidad de conexión de otro generador de energía, por ejemplo, una turbina eólica consiguiendo de esta manera una autonomía mayor. Este sistema es útil en los meses de invierno en los cuales la energía solar es menor.

En el caso de no disponer de la tecnología Multi Flow, el sistema no es capaz de utilizar la batería para almacenar la energía de otras fuentes de energía.

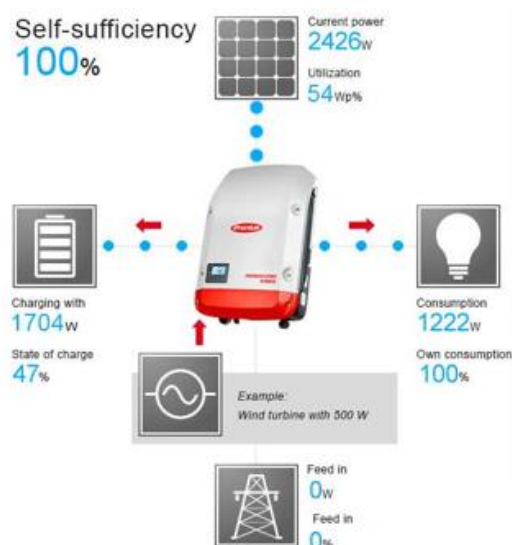


Figura 6.12. Carga de la batería y suministro de energía en la vivienda con distintas fuentes de energía.

Fuente: Fronius

4. Alimentación de emergencia o reserva utilizando energía mediante paneles fotovoltaicos y una batería

En situaciones de emergencia, el consumo de la vivienda es abastecido simultáneamente por los paneles fotovoltaicos y la batería. Esto implica que llegado el momento en el cual la batería este descargada, la instalación de paneles fotovoltaicos va a seguir funcionando y proporcionando energía.

En el caso de no disponer de esta tecnología la instalación de paneles fotovoltaicos no podría llegar a utilizarse, perdiendo así la energía obtenida.

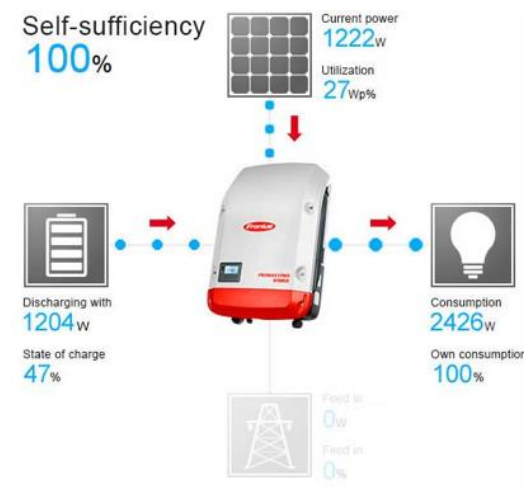


Figura 6.13. Alimentación de emergencia de la instalación de paneles fotovoltaicos.

Fuente: Fronius

7. PROBLEMÁTICAS A TENER EN CUENTA

7.1. SEGURIDAD Y SALUD

En el caso de las baterías es necesario incidir en un correcto uso a la hora de trabajar con ellas y manipularlas. Sabiendo con antelación los posibles peligros e inconvenientes que pueden llegar a generarse, es posible hacer de su uso y manipulación algo seguro. En cambio, si se producen y realizan malos usos de estas baterías a la hora de trabajar con ellas pueden llegar a originar incendios pudiendo provocar accidentes y peligros para la salud.

Por ello en los próximos apartados se procede a describir los posibles acontecimientos que se pueden llegar a generar en las baterías, para que de esta manera se proceda de una manera correcta.

7.2. CORTOCIRCUITOS

Una de las maneras más probables de generar un incendio es que se produzca un cortocircuito. Esto ocurre bien cuando las dos terminales de un paquete de baterías o bien de una sola celda se conectan, esto puede suceder de manera accidental. En resumen, la batería que se genera es un conjunto de paquetes en serie conectándose el terminal positivo con el negativo del siguiente paquete. Esto genera un circuito en el cual la corriente fluye de manera directa a través de la batería sin nada que la disminuya salvo la propia resistencia interna de la batería.

Cortocircuitar una batería es algo que nunca debería hacerse, pero bien puede ocurrir por un accidente o descuido. Frente a esto pueden darse dos escenarios:

1. En el mejor de los casos el cortocircuito solamente ocurre por unas fracciones de segundo produciendo un daño menor a la batería.
2. En el peor de los casos el cortocircuito se mantiene, produciéndose el recalentamiento de la batería, incendiándose y seguido de una reacción en cadena para el resto del conjunto de la batería pudiendo provocar grandes desperfectos dependiendo de donde se encuentre dicha batería, en nuestro caso en el hogar.

Los casos de cortocircuitado se pueden producir durante el montaje si bien no se tiene cuidado o no se está prestando la atención adecuada. A la hora de hacer las conexiones de los paquetes en serie hay que tener especial cuidado de no conectar los terminales de estos de manera errónea ya que la disposición de los paquetes de las baterías y sus correspondientes terminales han de estar todas en el mismo sentido. De la misma manera dentro de cada paquete de baterías las celdas han de estar todas dispuestas en el mismo sentido formando el grupo de paralelos.

Además, por precaución a la hora de manipular las baterías hay que evitar tener objetos metálicos innecesarios que puedan servir de conductor y generen cortocircuitos por un contacto indeseado con las baterías.

Otro aspecto a tener en cuenta y por el cual se pueden producir también cortocircuitos es el cableado de la batería. Hay que tener especial cuidado ya que, una vez montado el conjunto, el cableado que se conecta a distintas partes de la batería tiene distinta tensión

por lo que el contacto entre las partes finales de cable "pelado" puede generar un cortocircuito. Por eso es recomendable que a la parte descubierta del cable se le añada un conector o bien cinta aislante, en su defecto, desde el primer momento previamente a que se conecten a la batería.

7.3. RECALENTAMIENTO BATERÍAS Y REFRIGERACIÓN

Tanto el calor como el frío no ayudan ni permiten un óptimo rendimiento para las baterías. Un rango de temperatura elevado se traduce en pérdida de eficiencia, pérdida de sus capacidades y totalidad de su función y consecuentemente el acortamiento de su vida.

En primer lugar, la temperatura tanto de carga como de descarga de las celdas es un factor crítico que determina la pérdida de capacidad de la batería con el tiempo. Además, otro factor importante es la profundidad de descarga. A mayor temperatura de funcionamiento y mayor profundidad de descarga, mayor pérdida de capacidad con el tiempo.

Pese a ser posible que las celdas trabajen en torno a 60 °C y permitan descargarse a esa temperatura no es conveniente ni aconsejable que superen los 40 °C. Donde realmente reside el peligro es en temperaturas muy elevadas, ya que al superar los 130 °C existe la posibilidad de que suceda la fuga térmica o embalamiento térmico.

La fuga térmica es una situación en la que la corriente que fluye a través de la celda o batería en carga o sobrecarga hace que la temperatura de la celda aumente, lo que aumenta la corriente con un aumento adicional de la temperatura [35]. Esto ocurre cuando una celda alcanza la temperatura a la cual la temperatura continuará aumentando por sí sola y se vuelve autosuficiente a medida que crea oxígeno que alimenta el fuego.

Una vez que la temperatura de la celda alcanza aproximadamente 80 °C, la capa de interfase electrolítica sólida (SEI) comienza a descomponerse en el ánodo y a descomponerse en una reacción exotérmica debido a la reacción del litio con los solventes utilizados en el electrolito. A aproximadamente 100 °C - 120 °C, el electrolito comienza a descomponerse en otra reacción exotérmica, que a su vez genera varios gases dentro de la celda. Los gases que pueden crearse durante esta reacción, dependiendo de la química celular, incluyen dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4) e hidrógeno (H_2).

A medida que la temperatura se acerca a los 120 °C -130 °C, el separador finalmente se derrite permitiendo que los electrodos del ánodo y el cátodo entren en contacto y provoquen un cortocircuito interno generando más calor. A medida que la temperatura continúa aumentando, en torno a los 130 °C - 150 °C, el cátodo comienza a descomponerse en otra reacción química exotérmica con el electrolito que también genera oxígeno. Es esta liberación de oxígeno junto con el electrolito de carbonato LiPF_6 lo que finalmente permite que la celda se queme y se incendie. La descomposición del material activo del cátodo es una reacción altamente exotérmica que genera mucho calor y continúa impulsando la celda hacia su fallo y el fuego.

Cuando las temperaturas se elevan por encima de 150 °C - 180 °C, la reacción puede volverse autosuficiente si la celda no puede disipar rápidamente el calor generado. En este punto, esta se encuentra en lo que se conoce como "fuga térmica", ya que la generación de oxígeno hace que el fuego sea autosuficiente, al menos hasta que se haya utilizado todo el

combustible. Si los gases continúan acumulándose dentro de la celda, esta puede romperse o abrirse a través de una válvula de seguridad. En este punto, los gases de hidrocarburos inflamables y los electrolitos de hidrofluorocarbono están expuestos a la introducción de una chispa que podría encender el electrolito y los gases causando llamas, fuego y potencialmente una explosión [36].

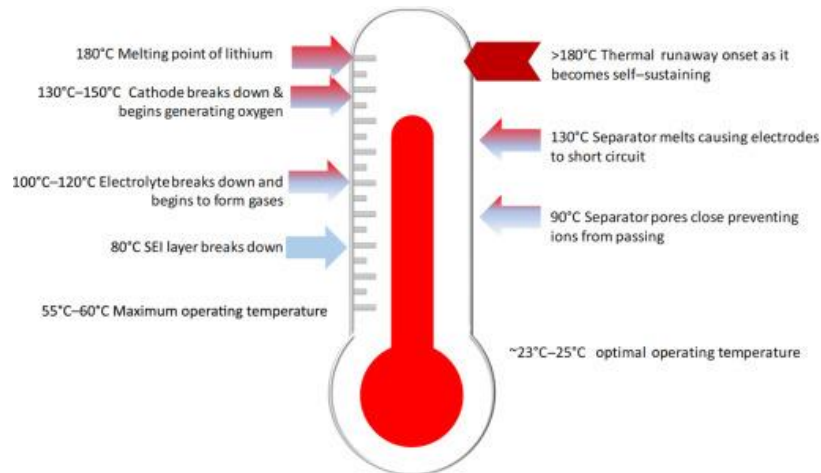


Figura 7.1. Efecto de la temperatura en una celda Li-ion.

Fuente: Lithium-Ion Battery Chemistries [36].

Por otra parte, las temperaturas muy bajas también suponen un problema para las baterías. Aunque la mayoría son capaces de descargarse a temperaturas de -20°C , estas nunca deberían cargarse a temperaturas menores que 0°C [37].

Elegir un método de enfriamiento adecuado para un paquete de baterías de iones de litio y elaborar una estrategia óptima de control de enfriamiento para mantener la temperatura en un rango óptimo de 15°C a 35°C es esencial para aumentar la seguridad, extender la vida útil del paquete y reducir los costes [13], ya que, como se ha explicado previamente, se produce calor durante los ciclos de trabajo de carga y descarga de la batería, el cual debe ser evacuado para que no influya en el rendimiento de la batería.

Cuando se elige un método de enfriamiento y estrategias de desarrollo, es necesario realizar intercambios entre muchas facetas, como costes, complejidad, peso, efectos de enfriamiento, uniformidad de temperatura y poder parasitario.

Hay varios métodos de enfriamiento de celdas, pero los más usados son los siguientes:

- Refrigeración por aire,
- Refrigeración por líquido directo,
- Refrigeración por líquido indirecto.
- Refrigeración por aleta o "fin".

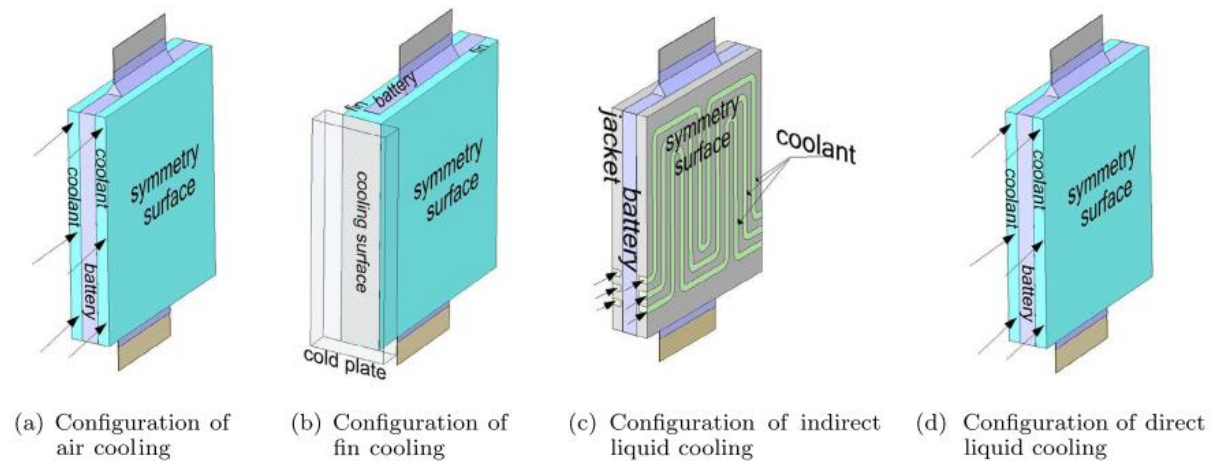


Figura 7.2. Configuraciones y métodos de refrigeración de una celda de bolsa.

Fuente: Battery Thermal Management Systems

Para mostrar su efectividad, estos métodos se evaluaron en un estudio utilizando una celda de bolsa de iones de litio de gran capacidad típica diseñada para vehículos eléctricos desde la perspectiva del consumo de energía parasitaria del refrigerante, máximo aumento de la temperatura, diferencia de temperatura en una celda y peso adicional utilizado para el sistema de refrigeración.

Los resultados mostraron que un sistema de refrigeración de aire necesita de 2 a 3 más energía que otros métodos para mantener el mismo promedio temperatura; un sistema de refrigeración líquido indirecto tiene el aumento de temperatura máximo más bajo; y el sistema de refrigeración “fin” agrega alrededor del 40% de peso extra a la celda, pesando más, cuando se consideran que los cuatro tipos de métodos de enfriamiento tienen el mismo volumen. Además, el enfriamiento líquido indirecto compuesto por un refrigerante a base de agua (agua/glicol) es una forma más práctica de refrigeración que el enfriamiento líquido directo compuesto por aceite mineral dieléctrico, pese a tener el primero un rendimiento de enfriamiento ligeramente inferior [38].

Además, como se puede observar en la Figura la refrigeración en ambos lados de mayor superficie de la batería rectangular es mejor que en uno solo [39].

Como aproximación se podrían considerar estos métodos de refrigeración extrapolados a un módulo o paquete de baterías ya que ambas son parecidas, tanto el módulo como las celdas de bolsa, al tener las dos geometrías rectangulares.

Otra posibilidad es la introducción de canales de refrigeración líquida entrelazados entre cada paquete de baterías, aunque es algo en desarrollo y que está en proceso de seguir investigándose puesto que la uniformidad térmica de la batería puede mejorar [40].

Normalmente, el ciclo de la batería se compone de su conjunto, una bomba o ventilador, un intercambiador de calor y el refrigerante y sus correspondientes tuberías o tubos.

Respecto a este ciclo de refrigeración, hay que tener en cuenta que añadir estos elementos supone un coste económico extra, y posibles problemas en el futuro como fugas por lo que el mantenimiento se incrementaría. Además, podrían añadirse más elementos como sensores de temperatura o filtros que con el tiempo habría que sustituir al igual que ocurre en los vehículos eléctricos

Por ello optaremos en nuestra batería por el método de refrigeración por aire.

Dentro de este método la disposición de las celdas dentro de cada paquete afecta en la distribución de calor que se genera dentro de cada paquete. Además, la separación de cada conjunto de paquete en serie también influye en el aire que pasa a través de ella. También el enfriamiento del caudal de aire de refrigeración se traduce un aumento del coeficiente de transferencia de calor y caída de presión [41].

Por lo tanto, la manera más sencilla y barata, aunque no la mejor en términos de rendimiento es la agrupación de celdas individuales dentro de cada paquete con una ligera separación entre filas, esto supone que si se aumenta la separación aumenta ligeramente el tamaño de cada paquete lo que influirá en la disposición y dimensión final del conjunto de la batería.

Otra posibilidad sería el uso de refrigeración de aire o ventilación forzada. Este método tiene mejor rendimiento con la distribución alineada frente a la escalonada [42]. También se descarta por la necesidad de una fuente de energía constante que suministre esa ventilación, aunque incluir esta posibilidad no sería algo descabellado ya que mejoraría ligeramente el rendimiento.

También existe la posibilidad de refrigeración líquida individual de cada celda en la parte exterior del cilindro, con la cual se obtienen rendimientos de refrigeración muy buenos, pero este método se descarta por la complejidad de diseño y reparación en caso de fallo, pese a ser una de las mejores alternativas [43].

Como se ha explicado, la disposición y separación afecta en la refrigeración de las celdas, por ello existe la posibilidad de agrupar las filas de las celdas de manera alineada o escalonada, afectando de la siguiente manera [44]:

- Para la disposición de celdas alineadas del paquete de baterías, el aumento de temperatura promedio de las celdas individuales disminuye a medida que aumenta el intervalo longitudinal. En cambio, el aumento de temperatura de la batería en promedio está positivamente relacionado con el intervalo longitudinal para la disposición escalonada de las celdas.
- El aumento del intervalo transversal conduce al aumento del aumento de la temperatura de la batería, al tiempo que mejora la uniformidad de la temperatura y reduce el requisito de energía para las disposiciones de celdas alineadas y escalonadas.

Por ello variables como la disposición, separación, espacio disponible y lugar para instalar la batería influirán a la hora de tomar la decisión de cómo realizar la configuración del conjunto.

Las baterías deben ser instaladas en una superficie plana donde no se exponga a altas temperaturas ni a la radiación directa del sol, pues durante su funcionamiento la

temperatura de la batería aumenta significativamente y puede repercutir seriamente en la misma.

Respetar los parámetros de carga, el mantenimiento y utilización de la batería hace que la batería dure el tiempo estimado. Si esto no ocurre la vida útil de la batería se reducirá drásticamente. Para optimizar la vida útil de las baterías se recomienda que siempre esté por encima del 70% de carga.

Por último, un estudio reciente y prometedor [45] propone una nueva estructura de refrigeración líquida mediante la introducción de gel de sílice modificado (SG). Agregando óxido de grafeno (GO) mejora la conductividad térmica del GO-SG de manera efectiva y la capacidad de transferencia de calor de las celdas a los tubos de enfriamiento. Además, el módulo o paquete de la batería de refrigeración por agua con GO-SG muestra un excelente rendimiento de refrigeración. También al ser el GO-SG flexible puede ofrecer al módulo de la batería un mejor rendimiento anticolidión.

7.4. ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN

Dependiendo del tipo de celda, las baterías de litio pueden ser más o menos frágiles. En el caso de las Li-ion cilíndricas, al estar recubiertas por un metal rígido permiten una cierta flexibilidad a la hora de manipular un conjunto de ellas sin la necesidad de sufrir daños.

En cuanto a su almacenamiento es preferible depositarlas y guardarlas en un compartimento plástico y nunca metálico. Además, deberán ser guardadas en un lugar en el cual no estén expuestas al sol.

En ambos casos es necesario tener en cuenta la posibilidad de que se produzca un cortocircuito por una disposición o manipulación inadecuadas.

7.5. REPARACIONES

Tanto en la construcción de la batería como en sus reparaciones, como se ha explicado anteriormente, es necesario evitar el riesgo de que se produzca un cortocircuito entre algunos de los elementos de la batería y las herramientas del usuario.

La ventaja de la configuración por celdas de la batería permite que a la hora de realizar las soldaduras celda por celda, en caso de producirse algún fallo y detectar su lugar de procedencia e identificar la celda o conjunto de celdas que no funcionan adecuadamente, su reparación individual hace que el resto no se vean afectadas en la manipulación y reparación sin tener que desmontar gran cantidad de componentes.

Esto se traduce en una menor complejidad de realizar las reparaciones y por consiguiente mayor eficiencia en la reparación, ahorrando tiempo de trabajo.

Sabiendo a priori que las principales problemáticas se van a dar en las degradación de las celdas y con la ayuda de una cámara térmica, gracias a la separación existente entre estas en cada módulo y su disposición en el soporte, será más fácil detectar donde se están produciendo los fallos o recalentamientos.

8. RESULTADOS

8.1. DIMENSIONES Y PESO DE LA BATERÍA

A la hora de decidir cómo montar e instalar cada módulo es necesario tener en cuenta el espacio del que se va a disponer en la vivienda, la simplicidad y facilidad a la hora de ensamblar el conjunto y su posterior mantenimiento.

Por ello, a continuación, se tabulan dos situaciones (A y B) para los dos casos teóricos propuestos.

La configuración de las celdas por filas y columnas será la misma en ambos casos A y B.

Para las columnas no habrá espacio de separación adicional entre celdas.

Para las filas, en cada holder compuesto de 4 perforaciones, las celdas estarán dispuestas en los extremos, es decir, dejando los dos espacios centrales libres para una mejor refrigeración de las celdas.

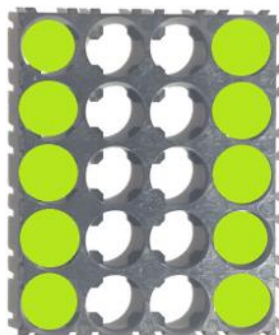


Figura 8.1. Disposición de las celdas en el soporte o holder.

Fuente: Elaboración propia

- A. 8 espacios en una fila con 2 soportes consecutivos (4x5) unidos
- B. 16 espacios en una fila con 4 soportes consecutivos (4x5) unidos

Primer caso 14s352p			Segundo caso 14s176p	
	A. 4 celdas por fila	B. 8 celdas por fila	A. 4 celdas por fila	B. 8 celdas por fila
Filas	88	44	44	22
Columnas	8	16	8	16
Holder columna	2	4	2	4
Holder fila	18	9	9	5
Holder totales (parte inferior)	36	36	18	20
Holder totales	36	36	18	20

(parte superior)				
Holders totales por módulo	72	72	36	40
Módulos	0.065 m x 14 módulos x 0.065 m x 13 espaciados entre módulos ³ =1.75 m			
Dimensiones (m)	1.75x1.74x0.16	1.75x0.88x0.32	1.75x0.88x0.16	1.75x0.44 x0.32

Tabla 8.1. Dimensiones y disposición de las celdas en los módulos de la batería.

Fuente: Elaboración propia

Tomando como solución el segundo caso B, serán necesarios 40 soportes por módulo, que en total, para 14 módulos, supondrán 560 soportes.

Resumiendo, las dimensiones de la batería serán: **1750mm x 440mm x 320 mm**

El peso correspondiente:

Peso de las celdas= $47.5 \text{ g} \times 2464 = 117040 \text{ g} = 117,04 \text{ kg}$

Peso del cableado de cobre (35mm^2) [46]= $(42 \text{ m} \times 294,99 \text{ kg/km}) \times (1\text{km}/1000 \text{ m}) = 12,38 \text{ kg}$

Peso holders= $40 \times 24,13 \text{ g} \times 14 \text{ módulos} = 13512,8 \text{ g} = 13,5128 \text{ kg}$

Peso aproximado total = **142,93 ± 1 kg**

Al peso aproximado total sería necesario incluir el peso perteneciente a los distintos elementos auxiliares que conforman la batería (BMS, fusibles, conectores y demás elementos), pero por falta de información exacta tomaremos la aproximación calculada arriba.

Comparando a continuación con las especificaciones técnicas de la batería Powerwall de Tesla [13], podemos comprobar que existe una cierta similitud tanto en dimensiones como en peso.

Dimensiones Tesla: 1150mm x 755mm x 155mm

Peso Tesla Powerwall: 125kg

8.2. VIABILIDAD ECONÓMICA Y ESPECIFICACIONES

Dependiendo de la manera de afrontar este proyecto se pueden encontrar dos situaciones posibles; comprar todos los dispositivos y componentes nuevos o bien reutilizar o comprarlos de segunda mano. Partiendo de la premisa de que el fin de este es buscar la

³ La separación entre módulos permite una mejor refrigeración al permitir el paso del aire por convección natural, además de permitir espacio entre los terminales de los módulos evitando que se pueda producir un cortocircuito.

manera más económica, sencilla y funcional posible, se ha escogido en la medida de lo posible la segunda opción, tratando cada dispositivo fundamental individualmente.

En el caso de las celdas de litio y por suponer el coste más significativo dentro de la batería, se ha estudiado y comparado las distintas alternativas tanto de obtención, como de especificaciones técnicas.

Por lo tanto, las celdas 18650 se pueden encontrar de diversas maneras, partiendo de la base de que no son baratas y de que la disponibilidad de estas no es siempre la requerida, la mejor opción, para un caso hipotético sin tener en cuenta el desembolso económico ni la reutilización, es comprarlas nuevas, ya que se garantiza la seguridad y la disponibilidad de diversas opciones.

- Baterías Nuevas

La principal opción y por lo tanto la mejor, es comprarlas directamente a un vendedor. Aunque bien estas sean más caras, su garantía de gran calidad, su seguridad y su conocimiento de vida útil son factores muy importantes a tener en cuenta.



Figura 8.2. Celdas 18650 de distintos fabricantes.

Fuente: Biobike

Ya sea vía online o mediante un suministrador de alguna compañía establecida en el país se pueden conseguir dichas celdas. En el mercado online, especialmente desde China, se pueden conseguir los mejores precios y al ser las celdas de litio de un tamaño pequeño como pueden ser las baterías 18650 seleccionadas, son envíos de fácil tramitación y baratos. Bien cabe añadir que la regulación de envío de baterías de litio está continuamente variando, pudiendo implicar cambios en el futuro.

Comprando celdas 18650 en lotes de cien en cien, el precio se ve reducido en torno al 10-30% en comparación si se compra de manera individual. El mejor distribuidor para ello es Alibaba y su división minorista AliExpress, teniendo en cuenta a la hora de buscar fijarse en una fuente de confianza con gran volumen de transacciones, años de experiencia en el sector y valoraciones positivas en general, ya que pueden encontrarse fraudes a la hora de comprar. Una manera segura de encontrar vendedores de confianza es mediante la búsqueda de foros dedicados a proyectos que requieran de estas mismas baterías.

Otra manera es acudir a un vendedor de cualquier tienda local, pagando más, pero asegurándose una garantía.

Por último, en cuanto a calidad solamente hay que fijarse y comprar a marcas establecidas y con gran reputación como Panasonic, Samsung, Sony, LG, etc. Estas marcas a diferencia de otras que puedan poseer precios más bajos requieren en sus empresas de un gran control de calidad. Una simple celda en mal estado conectada a un grupo de ellas en paralelo puede acabar afectando a todas.

Además, hay algunas empresas como Ultrafire, Trustfire o Surefire que se dedican a comprar las baterías rechazadas por las grandes compañías, implicando posibles riesgos.

Otra empresa de venta de celdas de litio originales y sin falsificaciones con reputación es la empresa holandesa NKON [47].

Marca	Modelo	Capacidad (mAh)	Precio (€)
Panasonic	NCR18650B	3400	6,03
Samsung	INR18650-30Q	3000	5,16
Sanyo	UR18650ZY	2600	4,30
KeepPower LG Chem	INR18650	3000	5,86
KeepPower	P1835J	3500	9,48

Tabla 8.2. Listado de diferentes celdas (capacidad y precio).

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la tabla, el precio de cada celda va directamente ligado a la capacidad de la misma, dependiendo del distribuidor y del lugar donde se vaya a comprar online podemos encontrar distintos precios.

- **Baterías usadas**

Estas baterías se pueden obtener de herramientas eléctricas o bien de ordenadores portátiles, por ejemplo, y están diseñadas para que tengan una vida útil de unos cuantos cientos o miles de ciclos. Muchas veces, debido a causas ajenas a las baterías estos dispositivos dejan de funcionar o bien se dañan, resultando en que las baterías por lo tanto todavía disponen de una vida útil y se pueden utilizar.

Muchas de estas baterías descartadas se pueden encontrar en negocios de reparación de ordenadores, centros de reciclaje, hospitales o clínicas que utilicen instrumentos que requieran de baterías.



Figura 8.3. Celdas 18650 de una batería de ordenador portátil.

Fuente: Endless Sphere

Aunque adquirir este tipo de baterías pueda resultar barato o en algunas ocasiones incluso gratuitas, disponen de varias desventajas. Para empezar, no se sabe de primera mano su calidad, si son de una marca reconocida o si han tenido un mal uso previamente. En cuanto a su capacidad, ésta al principio es desconocida, ya que se necesita comprobar cada celda para determinar cual tiene carga y cual tiene una capacidad de la batería razonable. Con el tiempo las celdas viejas pierden su capacidad, por lo que también es un factor importante a considerar. Un aspecto reseñable es el tiempo que se necesita para comprobar todas las celdas adquiridas, partiendo de la base que, según lo calculado previamente para el segundo caso son 2450 celdas que habría que comprobar. Por lo tanto, dependiendo de los evaluadores de los que se dispongan, esta actividad implica un gran volumen de tiempo.

Otro aspecto importante a considerar es que se desconoce la vida útil de las celdas usadas. Bien se puede saber más o menos, si se conoce la capacidad original de la celda y se compara con la capacidad que realmente tiene, pero no siempre es el caso ya que no todas las celdas usadas disponen de la información de su capacidad original o bien de su identificación. Además, si se dispone a construir una batería con celdas de distintas expectativas de vidas útiles, las primeras que se vayan agotando empezaran a arrastrar al resto. Las celdas en buen estado, por lo tanto, tendrán que compensar esto trabajando más, lo que se traduce en que se agotaran más rápido.

Por lo tanto, en el caso de decidir el uso de baterías usadas es muy recomendable usarlas de manera conservativa, es decir, tratando de no forzarlas en términos de potencia. En este caso es mejor construir una batería con mayor capacidad de la que realmente se requiere evitando así que se extraiga menos corriente de cada celda.

Otra posibilidad, la cual es considerada la mejor y se va a optar como solución, en términos de eficiencia del tiempo empleado, es recurrir a la compra de celdas a una empresa encargada de realizar la evaluación y testeo de estas a gran escala.

Un ejemplo de este tipo de empresas es Second Life Battery [48], una empresa española la cual se encarga de realizar estas evaluaciones de celdas de diferentes marcas y organizarlas según las especificaciones o requerimientos del usuario comprador, clasificándolas y agrupándolas por capacidades para su posterior envío.

OFERTA N° [REDACTED] [REDACTED]

Second Life Battery [REDACTED]

Celdas 18650 en 15s150p - Capacidad estimada: 20kWh

Posición	Referencia	Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Cap. Wh	Precio Total
00010	SN2300-80	NCR18650-26F-2380	1,15 €	950	9.907	1.092,50 €
00020	SN2200-80	NCR18650-26F-2280	1,08 €	1.300	9.491	1.404,00 €
00020	SN2200-80	NCR18650-26F-2280	-	50(2%)	422	0,00 €
00030	SKCOVTR	Termo-retractil 18650	-	100	-	0,00 €
Subtotal Celdas					19.820	2.496,50 €
Descuento 20% (web)						- 499,30 €
TOTAL Powerwall						1.997,20 €

21% I.V.A. no incluido

Figura 8.4. Presupuesto Second Life Battery

Fuente: Second Life Battery

El presupuesto de la Figura 8.4 lista un conjunto total de 2300 celdas de segunda mano con dos valores de capacidad distintos (2280-2380 mAh).

Para 2 Ah, el valor propuesto en nuestros cálculos, el precio del conjunto de celdas se vería reducido ligeramente. Posteriormente para la elaboración del presupuesto total se tomará este valor unitario como referencia y se extrapolará para el caso planteado y su correspondiente número de celdas.

- Baterías de vehículos eléctricos usadas

La opción de compra de baterías de vehículos eléctricos es un término intermedio entre comprar baterías nuevas o usadas. Estos módulos cada vez se pueden encontrar con mayor facilidad en lugares como eBay debido al auge de los vehículos eléctricos en el mercado. La posibilidad de compra de estas baterías son producto de actualizaciones o mejoras de baterías, sustituciones o bien debido a accidentes.

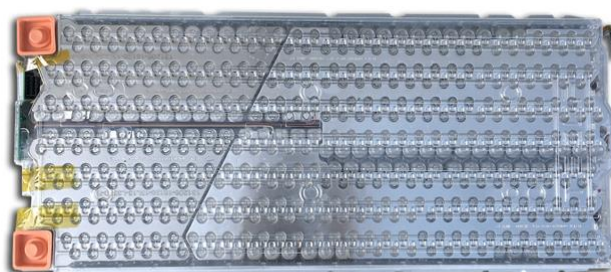


Figura 8.5. Batería del Tesla Model S.

Fuente: EV West

La principal ventaja de estas baterías es que pese a no saber los ciclos de vida útil que les quedan a las celdas, es conocido que todas las celdas han de tener los mismos ciclos de

carga. Además de esto, garantizan una buena marca y autenticidad, siempre y cuando provengan de un vehículo eléctrico conocido por ello.

Algunos vehículos, como los fabricados por Tesla disponen de baterías formadas por miles de celdas pequeñas. Otros en cambio se componen de celdas de mayor tamaño, por lo tanto, esto ha de tenerse en consideración previamente dependiendo del modelo que se quiera utilizar.

8.3. MÁRGENES DE PRESUPUESTO

Para la elección del segundo caso, y la propuesta de configuración de los módulos “B”, de 1 día de autonomía con celdas compradas de segunda mano, el presupuesto resultante es el siguiente:

Componente	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio (€)
Celdas ⁴	2464 + 50 (repuesto) = 2514	1,08	2715,12
BMS	1	680,21	680,21
Estructura espaciadora o soportes	56	7,07	395,92
Embarrado/Barra de cobre	42	8,08	339,36
Fusible de cristal	3	7,28	21,84
Tira de níquel	1	7,99	7,99
Evaluable/Cargador de baterías	1	28,96	28,96
Cámara térmica	1	240,79	240,79
Máquina de soldar por puntos	1	155,44	155,44
Soldador de estaño	1	14,99	14,99
Conectores Anderson	3	53,99	161,97
Interruptor aislador	1	16,99	16,99
Multímetro digital	1	25,99	25,99
Tubo PVC termo retráctil	1	10,60	10,60

⁴ El precio de las celdas es orientativo, ya que depende de la capacidad de estas en el mercado de segunda mano.

Total ⁵			4816,17
--------------------	--	--	---------

Tabla 8.3. Presupuesto para el conjunto de la batería.

Fuente: Elaboración propia

En comparación con la batería Powerwall de Tesla siendo su coste total del equipo de 8240 € (7500 € Powerwall + 740 € equipo de soporte) [49], podemos ver si analizamos única y exclusivamente el precio de nuestra batería frente a la batería de Tesla lo siguiente:

Ahorro: 7500 € - 4816,17 € = **2683,83 €**

Porcentaje de ahorro: 35,78%

Por otro lado, hay que recalcar que a estos precios habría que incluir costes de instalación en ambos casos además de un equipo de soporte para el conjunto de nuestra batería. Otro aspecto crucial que considerar es el tiempo necesario de adquisición de los componentes, así como de la construcción del conjunto.

Por último, el tiempo y precio de mantenimiento en caso de que los elementos que conforman la batería sufriesen fallos, deterioro o en caso de accidente es otro aspecto a considerar puesto que, no se dispondría de ningún tipo de garantía para el conjunto global de nuestra batería frente a la ventaja de 10 años de garantía que propone Tesla [13].

⁵ Es necesario incidir en la aproximación orientativa del precio de los componentes a consecuencia de que estos pueden fluctuar en la red.

9. CONCLUSIONES

Después de realizar este trabajo, las conclusiones que se han obtenido son las siguientes:

- Para poder realizar y fabricar una batería de estas características es necesario contar con un gran volumen de celdas. Estas son el principal coste dentro de la batería y siendo además el de mayor relevancia, puesto que condicionan las especificaciones técnicas de la batería. Pese a que pueda parecer un gran desembolso económico, no es comparable al incremento del precio que supondría la fabricación de la batería con celdas nuevas.
- Por otra parte, aunque en el presupuesto no se ha reflejado el coste asociado al proceso de producción, se entiende que el mismo es equiparable o similar al que supondría realizarlo con baterías nuevas.
- Respecto a lo comentado anteriormente, hay un factor que puede afectar a la comparativa entre baterías usadas o nuevas, que es el asociado a la posible reparación.
- En resumen de los puntos anteriores, en comparación con las baterías de Tesla, el conjunto de la batería expuesta es más barato, punto favorable y determinante de cara a su realización.
- La instalación eléctrica de la batería en el hogar es otro punto a tener en cuenta y el cual, en el apartado económico y de presupuestos, no se ha reflejado en este proyecto. Esto supondría una elevación en el coste global de la batería para el hogar, pero se entiende que sería de orden similar a la instalación de un sistema de baterías nuevas.
- La garantía de las baterías Tesla es de un periodo de diez años. En el caso expuesto se podría ofrecer un servicio de mantenimiento gratuito durante un periodo de uno o dos años y a partir de ahí un contrato de mantenimiento de bajo coste atractivo para el usuario.
- En lo que respecta al retorno de la inversión, el coste de la batería expuesta es aproximadamente dos tercios del de una nueva y el periodo para la recuperación de esta inversión se acorta en poco más de una tercera parte del tiempo de un sistema nuevo.
- En cuanto a sostenibilidad y medio ambiente, cabe destacar que la obtención de las celdas a partir de un mercado de reutilización contribuye y beneficia al reciclaje de las baterías, promoviendo una fabricación más sostenible minimizando el impacto generado. Durante la realización de este trabajo, el reciclaje de las baterías de iones de litio es un frente clave a gestionar y previsible futuro negocio de cara a minimizar el impacto medioambiental.
- La seguridad es un factor determinante en cualquier proceso de producción y mantenimiento de baterías. Es determinante garantizar una correcta manipulación y almacenaje de componentes debido a su peligrosidad, para asegurar la salud y seguridad de los trabajadores y usuarios finales.

10. BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

1. Volta, Alexander. On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds. In a Letter from Mr. Alexander Volta, F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K.B. P.R.S.Phil. 1800.
2. Seba, Tony. Tony Seba. *Disrupcion limpia de la energía y el transporte*. [En línea] 15 de Junio de 2014. [Citado el: 2019 de Julio de 23.] <https://tonyseba.com/portfolio-item/disrupcion-limpia-de-la-energia-y-el-transporte/>. ISBN--978-0-9970471-0-3.
3. *Less is more. Resource efficiency through waste collection, recycling and reuse of aluminium, cotton and lithium in Europe*. Friends of the Earth Europe, GLOBAL 2000. Viena : s.n., 2010, págs. 7-10.
4. Melin, Hans Eric. *State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – a research review*. Circular Energy Storage . London : s.n., 2019.
5. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. *Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo*. Gobierno de España. 2015.
6. Jefatura del Estado. *Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores*. Gobierno de España. 2018.
7. Tribunal Constitucional de España. *SENTENCIA 68/2017, de 25 de mayo*. 2017.
8. Jefatura del Estado. *Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico*. Gobierno de España. 2013.
9. Ministerio para la Transición Ecológica. *Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica*. Gobierno de España. 2019.
10. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. *Real Decreto 1544/2011, de 31 de octubre, por el que se establecen los peajes de acceso a las redes de transporte y distribución que deben satisfacer los productores de energía eléctrica*. Gobierno de España. 2011.
11. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. *Real Decreto 216/2014, de 28 de marzo, por el que se establece la metodología de cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor de energía eléctrica y su régimen jurídico de contratación*. Gobierno de España. 2014.
12. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts Institute of Technology. *A Guide to Understanding Battery Specifications*. [En línea] Diciembre de 2008. [Citado el: 18 de Noviembre de 2019.] http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf.

13. Tesla. TESLA.COM/ENERGY. [En línea] Tesla Powerwall, 11 de Enero de 2018.
https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall_2_CA_Datasheet_na_es_panol.pdf.
14. Panasonic. Panasonic Industrial. [En línea] [Citado el: 29 de Julio de 2020.]
https://www.imrbatteries.com/content/panasonic_ncr18650b-2.pdf.
15. DNKPower. dnkpower. [En línea] [Citado el: 14 de Enero de 2020.]
<https://www.dnkpower.com/18650-battery-cell-manufacturing-process/>.
16. Batrium Technologies. Batrium. [En línea]
<https://www.batrium.com/products/watchmon4-longmon>.
17. AliExpress. Soportes espaciadores de baterías 4x5 celdas 18650. [En línea]
<https://es.aliexpress.com/item/4000088634715.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.408163c0ybRBuA>.
18. Victron Energy. Recommended battery cables. [En línea] 2020. [Citado el: 27 de Julio de 2020.] <https://www.victronenergy.com.es/upload/documents/BatteryCables.pdf>.
19. Leeftink, Margreet. Victron Energy, Wiring Unlimited, Rev. 06. [En línea] [Citado el: 27 de Julio de 2020.] <https://www.victronenergy.com.es/upload/documents/Wiring-Unlimited-ES.pdf>.
20. Amazon. Amazon. *Cable de Arranque de Baterías H07V-K 35 mm2 de sección*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2020.] <https://cutt.ly/YdSblza>.
21. AliExpress. AliExpress. *Fusible Axial rápido de cristal*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2020.]
<https://es.aliexpress.com/item/32798638613.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.408163c0ybRBuA>.
22. Amazon. Amazon. *Tira de Níquel*. [En línea] [Citado el: 3 de Agosto de 2020.]
<https://amzn.to/2QR4Oli>.
23. AliExpress. AliExpress. [En línea] <https://n9.cl/7k8c>.
24. Amazon. Amazon. *FLIR ONE cámara térmica para Android USB-C*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2020.] <https://cutt.ly/gSPSgq2>.
25. AliExpress. AliExpress. *Máquina para soldar por puntos*. [En línea] [Citado el: 29 de Julio de 2020.]
<https://es.aliexpress.com/item/4000233201411.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.408163c0ybRBuA>.
26. Amazon. Amazon. *Soldador de estaño de 100 W*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2020.] <https://amzn.to/39LNkWP>.
27. AliExpress. AliExpress. *Conector Anderson 175A*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2020.] <https://cutt.ly/6d0X3dQ>.
28. Amazon. Amazon. *Interruptor aislador de la batería*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2020.] <https://cutt.ly/hsP70Bu>.

29. —. Amazon. *Multímetro digital*. [En línea] [Citado el: Julio de 28 de 2020.] <https://cutt.ly/lsAtlBa>.
30. —. Amazon. *Tubo PVC termo retráctil*. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2020.] <https://cutt.ly/KsAauFn>.
31. Red Eléctrica de España. *Red Eléctrica de España*. [En línea] [Citado el: 23 de Julio de 2020.] <https://www.ree.es/es>.
32. Krannich solar . Krannich solar blog. [En línea] [Citado el: 2 de Agosto de 2020.] <https://blog.krannich-solar.com/es/>.
33. Naked Solar. Naked Solar Storage. [En línea] [Citado el: 5 de Julio de 2020.] <https://naked solar.co.uk/storage/>.
34. Fronius. Fronius. *Multi Flow Technology*. [En línea] [Citado el: 2 de Agosto de 2020.] <https://www.fronius.com/es-es/spain/energia-solar/experiencia/multi-flow-technology>.
35. Jorgen Garche, Chris K. Dyer, Patrick T. Moseley, Zempachi Ogumi, David A. J. Rand, Bruno Scrosati. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. s.l. : Elsevier Science, 2009. págs. 705-714. 9780444520937.
36. Warner, John T. Lithium-ion battery operation. *Lithium-Ion Battery Chemistries*. s.l. : Elsevier, 2019, 3, págs. 43-77.
37. *Influence of low temperature conditions on lithium-ion batteries and the application of an insulation material*. Dongxu Ouyang, Yaping He, Jingwen Weng, Jiahao Liu, Mingyi Chen. 16, s.l. : The Royal Society of Chemistry, 19 de Marzo de 2019, RSC Advances, págs. 9053–9066.
38. *Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells*. Dafen Chen, Jiuchun Jiang, Gi-Heon Kim, Chuanbo Yang, Ahmad Pesaran. [ed.] C. N. Markides. Beijing & Golden, CO : Elsevier, 2016, Applied Thermal Engineering, Vol. 94, págs. 846-854. ISSN 1359-4311.
39. *A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module*. Liwu Fan Khodadadi, J.M. y Pesaran, A.A. [ed.] Stefano Passerini. Auburn, AL : Elsevier, 15 de Septiembre de 2013, Journal of Power Sources, Vol. 238, págs. 301-312. ISSN 0378-7753.
40. *Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow*. Wenjong Cao, Chunrong Zhao, Yiwei Wang, Ti Dong, Fangming Jiang. [ed.] T. S. Zhao. Guangdong, Beijing : Elsevier, Agosto de 2019, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 138, págs. 1178-1187. ISSN 0017-9310.
41. *Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling*. Lip Huat Saw, Yonghuang Ye, Andrew A.O. Tay, Wen Tong Chong, Seng How Kuan, Ming Chian Yew. [ed.] Jinyue Yan. Kajang, Singapore, Fujian, Malaya : Elsevier, 1 de Septiembre de 2016, Applied Energy, Vol. 177, págs. 783-792. ISSN 0306-2619.
42. *Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries*. Yuqian Fan, Yun Bao, Chen Ling, Yanyan Chu, Xiaojun Tan, Shuting Yang. [ed.] C. N. Markides. Guangzhou, Xinxiang : Elsevier, 5 de Junio de 2019, Applied Thermal Engineering, Vol. 155, págs. 96-109. ISSN 1359-4311.

43. *Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery*,. Jiateng Zhao, Zhonghao Rao, Yimin Li. [ed.] Dr. Mohammad Ahmad Al-Nimr. Xuzhou : s.n., 2015, Energy Conversion and Management, Vol. 103, págs. Pages 157-165. ISSN 0196-8904.
44. *Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements*. Naixing Yang, Xiongwen Zhang, Guojun Li, Dong Hua. [ed.] C. N. Markides. Xi'an : Elsevier, 2015, Applied Thermal Engineering, Vol. 80, págs. 55-65. ISSN 1359-4311.
45. *Experimental investigation on a novel liquid-cooling strategy by coupling with graphene-modified silica gel for the thermal management of cylindrical battery*. Youfu Lv, Dequan Zhou, Xiaoqing Yang, Xiangyun Liu, Xinxi Li, Guoqing Zhang. [ed.] C. N. Markides. Guangzhou : Elsevier, Agosto de 2019, Applied Thermal Engineering, Vol. 159. ISSN 1359-4311.
46. Elementos Magnéticos Navarra S.L. <http://www.elementosmagneticos.com/>. [En línea] [Citado el: 7 de Agosto de 2020.] https://irp-cdn.multiscreensite.com/43609dd1/files/uploaded/Peso_y_Seccion_hilos_por_Diametros.pdf.
47. NKON. NKON. [En línea] <https://eu.nkon.nl/>.
48. Second Life Battery. Second Life Battery. [En línea] <http://www.batterysecondlife.com/>.
49. Tesla. Tesla Powerwall. [En línea] [Citado el: 7 de Agosto de 2020.] https://www.tesla.com/es_ES/powerwall.
50. *Thermal analysis of lithium-ion batteries*. S.C. Chen, C.C. Wan, Y.Y. Wang. 1, Hsin-Chu : Elsevier, Septiembre de 2004, Journal of Power Sources, Vol. 140, págs. 111-124. ISSN 0378-7753.

Bibliografía Complementaria

1. Park, Jung-Ki. Principles and Applications of Lithium Secondary Batteries. [ed.] John Wiley & Sons. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co, 2012. 3527650423, 9783527650422.
2. Bruno Scrosati, K. M. Abraham, Walter A. van Schalkwijk, Jusef Hassoun. Lithium Batteries: Advanced Technologies and Applications. [ed.] John Wiley & Sons. Hoboken: The Electrochemical Society Series, 2013. 1118615395, 9781118615393.
3. Ozawa, Kazunori. Lithium Ion Rechargeable Batteries: Materials, Technology, and New Applications. [ed.] John Wiley & Sons. Tokyo: Wiley-VCH Verlag & Co, 2012. 3527644652, 9783527644650.
4. Zhengcheng Zhang, Sheng Shui Zhang. Rechargeable Batteries: Materials, Technologies and New Trends. [ed.] Springer. s.l.: Green Energy and Technology, 2015. 3319154583, 9783319154589.
5. Wu, Yuping. Electrochemical Energy Storage and Conversion-Lithium-Ion Batteries: Fundamentals and Applications. [ed.] CRC Press. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2015. Vol. 4. 1498760066, 9781498760065.
6. Andrew F. Blum, R. Thomas Long Jr. Fire Hazard Assessment of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems. New York: Springer, 2016. 1493965565, 9781493965564.
7. C Menictas, M Skyllas-Kazacos, T M Lim. Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage: Types and Applications. [ed.] Elsevier. Oxford: Woodhead Publishing Series in Energy, 2014. 1782420223, 9781782420224.
8. Toll, Micah. DIY Lithium Batteries: How to Build Your Own Battery Packs. s.l.: Toll Publishing, 2017. 0989906701, 9780989906708.
9. Buchmann, Isidor. *Batteries in a Portable World - A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*-. 4th. s.l.: Cadex, 2016. ISBN 978-0968211847.

ANEXO

Cálculos de refrigeración de la batería

Los cálculos de refrigeración de la batería se van a proceder a calcular en base al primer principio de la termodinámica y por consiguiente a su transferencia de calor entre la batería y el medio.

Se va a proponer un modelo aproximado en régimen estacionario (se establece un equilibrio térmico y toda la masa de la batería está a la temperatura superficial determinada), el cual se asimila el conjunto de la batería con un prisma rectangular.

Para ello partimos de unos criterios básicos y de datos obtenidos de nuestra celda y conjunto de batería. Cabe remarcar que la temperatura para la cual se procederá al cálculo se corresponde con el valor límite superior de funcionamiento óptimo de las celdas.

Los datos de partida con los que contamos para realizar los cálculos son:

- Temperatura superficial de la batería (límite superior): 60 °C, 333 K
- Temperatura ambiente: 25 °C, 298 K
- Tensión de cada celda: 3.6 V
- Corriente suministrada por cada celda: 1 A
- Dimensiones de la batería (largo x ancho x altura): 1.75x0.44x0.32 m
- Resistencia interna de la celda: 0.11 Ω
- Masa: 117 kg aprox.
- Capacidad calorífica específica del aluminio: 0.897 J/g.K
- Conductividad térmica del aluminio: 205 W/m.K

Primero se procede a calcular el calor a disipar, para ello es necesario tener en cuenta la tensión e intensidad, 52 V y 176 A aproximadamente, a suministrar por la batería, además de la resistencia interna total, teniendo en cuenta las 176 celdas conectadas en paralelo por módulo y los 14 módulos conectados en serie. Una vez obtenido este valor, se calculará el área de transmisión de calor por convección.

Por último, con todos estos valores obtenidos se procederá a calcular el coeficiente de convección para nuestra batería, a través de la ley de enfriamiento de Newton.

En el caso de realizar un modelo transitorio los criterios a aplicar constarían de lo siguiente:

Balance de energía:

$$c_{\text{bat}} m_{\text{bat}} \frac{dT_{\text{bat}}(n)}{dt} = Q_{\text{gen}}(n) - Q_{\text{dis}}(n) + Q_{\text{cond}}(n)$$

Siendo c_{bat} la capacidad calorífica de la batería, en este caso del aluminio, Q_{gen} el calor generado por las celdas que corresponde al producido por el efecto Joule. El término Q_{dis} , es el calor disipado por la refrigeración del aire por convección natural y Q_{cond} el calor transferido al interior de las celdas por conducción.

Para obtener el coeficiente de transmisión de calor por convección es necesario conocer determinados números adimensionales. Estos son el número de Nusselt, Reynolds y Prandtl siendo sus correspondientes ecuaciones las siguientes respectivamente:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{K_f} = C Re_L^m Pr^n ; \quad Re_L = \frac{VL}{\nu} ; \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Transferencia de calor

- Conducción

La ecuación que determina la transferencia de calor por conducción es la denominada Ley de Fourier.

$$q'' = -k\nabla T$$

Siendo k la conductividad térmica (W/m.K) del material. El gradiente de temperatura permitido en una celda de la batería y la diferencia entre celdas quedará restringido entre 5 °C y 10 °C.

- Convección

La ecuación que determina la transferencia de calor por convección es la denominada Ley de Enfriamiento de Newton.

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

Siendo T_s la temperatura en la superficie de la batería, T_∞ la temperatura del fluido, en este caso aire, y h el coeficiente de convección.

Para disipar el calor del conjunto de la batería se ha optado por la transferencia de calor por convección natural entre la superficie de la celda y el fluido (aire). Por ello el coeficiente h es determinante para determinar la actuación de la transferencia de calor.

Debido a que algunos términos de las ecuaciones de los números de Nusselt, Reynolds y Prandtl se obtienen empíricamente, se hará una aproximación del valor del coeficiente de transmisión por convección ya que en el caso de régimen estacionario la temperatura no varía con el tiempo.

Para ello se plantea una aproximación a través del balance de calor a disipar presente en el conjunto de la batería.

Balance de calor

$$Q_{dis} = Q_{gen} + Q_{cond}$$

$$Q_{gen} = Q_{Joule} = I^2 \cdot R_{interna}$$

$$R_{interna}(\text{Módulo})^{-1} = \sum \frac{1}{R_{int}} = 176 \cdot \frac{1}{0.11} = 1600 \, \Omega \text{ (Paralelo)}$$

$$R_{interna}(\text{Módulo}) = \frac{1}{1600} = 6.25 \cdot 10^{-4} \, \Omega$$

$$R_{interna}(\text{Conjunto Batería}) = \sum R_{interna}(\text{Módulo}) = 14 \cdot 6.25 \cdot 10^{-4} = 8.75 \cdot 10^{-3} \, \Omega \text{ (Serie)}$$

$$Q_{gen} = 176^2 \cdot 8.75 \cdot 10^{-3} = 271.04 \, W$$

$$Q_{cond} = hA \frac{\Delta T}{L} = 205 \cdot (1.75 \cdot 0.44) \cdot \frac{10}{0.32} = 4932.81 \, W$$

Siendo la ΔT de 10°C, quedando de esta manera restringida en este valor.

$$Q_{dis} = Q_{gen} + Q_{cond} = 5203.85 \, W$$

El calor a disipar por lo tanto, se tiene en cuenta haciendo una aproximación de la batería como un prisma rectangular, calculando su área total para la transmisión de calor por convección.

Área de transmisión de calor:

$$A = 2 \cdot h \cdot (\text{largo} + \text{ancho}) + 2 \cdot \text{largo} \cdot \text{ancho} = 2.9416 \text{ m}^2$$

Coeficiente de convección:

$$h = \frac{Q_{\text{dis}}}{A \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}})} = \frac{5203.85}{2.9416 \cdot (333 - 298)} = 50.54 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Si comparamos el valor del coeficiente de convección obtenido con los valores habituales:

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección	
Proceso	h [W/m ² K]
• <i>Convección libre</i>	
– Gases	2 - 25
– líquidos	50 - 1000
• <i>Convección forzada</i>	
– Gases	25 - 250
– líquidos	50 - 20000
• <i>Convección con cambio de fase</i>	
– Ebullición o condensación	2500 - 100000

Figura Anexo.1. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Fuente: UPV

Podemos llegar a la conclusión de que, debido al valor obtenido del coeficiente de transferencia de calor por convección, este valor está en el rango de convección forzada. Esto es indicativo, a primera vista, de la necesidad de instalación de un sistema de refrigeración por convección forzada para nuestro conjunto de la batería, ya que un excesivo calentamiento podría dificultar el correcto funcionamiento de ésta.

Para un cálculo más acorde a la realidad sería necesario establecer un modelo transitorio más complejo incluyendo mayor número de variables, tales como: pérdidas por radiación, velocidad de entrada del aire, transferencia de calor por conducción interna de los distintos materiales internos de las celdas, separación entre celdas, materiales que lo componen, etc.

Además de esto, habría que tener en cuenta que la temperatura en las celdas no es uniforme, es decir la temperatura superficial no será constante ya que depende de la distancia al punto más caliente de la propia celda. Por otra parte la disipación del calor tampoco será uniforme debido a la aproximación realizada con un prisma rectangular.

Es por ello que es necesario el cálculo a través de software CFD (Computational Fluid Dynamics), como puede ser ANSYS Fluent o bien mediante métodos de elementos finitos. Esto supondría resultados mucho más precisos, pero esto se aleja del propósito de este proyecto.